

**PALÄO- UND GESTEINSMAGNETISCHE
UNTERSUCHUNGEN AN PROBEN AUS DER
LIBYSCHEN WÜSTE (SÜDWEST-ÄGYPTEN) UND
NORD-SUDAN: BEITRÄGE ZUR
POLWANDERKURVE AFRIKAS**

Stefan Saradeth

PALÄO- UND GESTEINSMAGNETISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN PROBEN AUS DER LIBYSCHEN WÜSTE (SÜDWEST-AGYPTEN)
UND NORD-SUDAN:
BEITRÄGE ZUR POLWANDERKURVE
AFRIKAS

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der
Fakultät für Geowissenschaften
der
Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt
von
Stefan Saradeth

10. November 1986

1. Berichterstatter: Prof. Dr. H. Soffel
2. Berichterstatter: Prof. Dr. A. Schult
Tag der mündlichen Prüfung: 09. Februar 1987



drucken + binden
gmbh
Schellingstraße 23
8000 München 40
☎ 089/284445

Maßsystem und verwendete Abkürzungen:

In dieser Arbeit wird ausschließlich das Meter-Kilogramm-Sekunde-Ampere- (MKSA) oder SI- (Systeme Internationale) Maßsystem verwendet. Dieses System ist seit 1970 gemäß dem "Gesetz über Einheiten im Meßwesen" in der Bundesrepublik vorgeschrieben und seit 1973 von der International Union of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) empfohlen (MELCHIOR, 1974). Es löst langsam das im Bereich Erdmagnetismus vielfach verwendete Centimeter-Gramm-Sekunde- (cgs) System ab:

Die Stärke eines äußeren Magnetfelds wird in Einheiten der magnetischen Induktion B, die Magnetisierungsstärke in Einheiten der Magnetisierung, genauer magnetisches Dipolmoment pro Einheitsvolumen M und die Werte der Suszeptibilität als Verhältnis von M und Magnetfeld H angegeben.

Praktische Gründe für die Verwendung von B und M im Gebiet Paläomagnetik und Gesteinsmagnetik gibt SHIVE (1986). Grundsätzliche Überlegungen zur Verwendung der Felder B und H stellen HAHN (1978) und PURCELL (1965) an. Wir folgen hier PURCELL und bezeichnen B als den fundamentalen magnetischen Feldvektor, kurz Magnetfeld und beziehen uns auf H als Feld H oder Magnetfeld H.

Im folgenden wird eine Auflistung der verwendeten Größen gegeben mit Angabe der Einheiten im cgs- und MKSA-System sowie die Umrechnungsfaktoren. Eine vollständige Liste findet sich bei PAYNE (1981).

Bezeichnungen, Abkürzungen, Einheiten und Umrechnungsfaktoren:

Symbol	Bezeichnung	Einheiten		
		SI	= Faktor *	cgs
B	magnetische Induktion,	Tesla (T)	10^4	G
	Magnetfeld B	mT	10^1	G
MDF	Spitzenfeldstärke, die 50% der NRM abbaut	"	"	"
H	Magnetfeld H	A/m	$4 \cdot \pi / 10^3$	Oe
M	Magnetisierung (Mag.)	A/m	10^{-3}	G
M _s	Sättigungsmagnetisierung	"	"	"
NRM	Natürliche Remanente Mag.	"	"	"
VRM	Viskose Remanente Mag.	"	"	"
IRM	Isothermale Remanente Mag.	"	"	"
CRM	Chemische Remanente Mag.	"	"	"
TRM	Thermoremanente Mag.	"	"	"
CARM	Charakteristische Reman. Mag.	"	"	"
X	Suszeptibilität	dim.los	$1/(4 \cdot \pi)$	dim.los
a ₀	Gitterkonstante	Å, nm	1	Å, nm
d	Netzebenenabstand	Å, nm	1	Å, nm
T	Temperatur	°C, K	1	°C, K
T _c	Curie-Temperatur	"	"	"
T _B	Blockungstemperatur	"	"	"
Ma	Alter (Mio. Jahre)	a	1	a
N	Anzahl	dim.los	1	dim.los
Dekl	Deklination	Grad, °	1	Grad, °
Inkl	Inklination	"	1	"
k, K	Präzisionsparameter	dim.los	1	dim.los
α ₉₅ , A ₉₅	Konfidenzwinkel, Halbwinkel des 95%-Vertrauenskegels	Grad, °	1	Grad, °



Digitized by the Internet Archive
in 2026

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite:
1.0 <u>Vorwort</u>	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.3 Fragestellung	4
2.0 <u>Geologie</u>	9
2.1 Überblick	9
2.2 Ringkomplexe	10
2.3 Schlußfolgerungen	11
3.0 <u>Geländearbeit</u>	13
3.1 Arbeitsbedingungen	13
3.2 Verfügbarkeit geologischer Daten	14
3.3 Auswahlkriterien	14
3.4 Beprobung	15
4.0 <u>Grundlagen der Messungen</u>	22
4.1 Grundlagen der Paläomagnetik	22
4.2 Remanenzmessung und ihre Verläßlichkeit	24
4.2.1 Gerätebeschreibung	24
4.2.2 Meßgüte und Empfindlichkeit	25
4.2.2.1 Einzelmessung	25
4.2.2.2 Probenmessung	27
4.2.2.2.1 Kontrollparameter	27
4.2.2.2.2 Testmessungen und Empfindlichkeit	29
4.2.2.2.3 Magnetisierung der Plattform	30
4.2.2.3 Mehrfache Probenmessung	30
4.2.2.4 Gütekriterium	31
4.2.3 Zusammenfassung	31

5.0	<u>Messungen und Ergebnisse</u>	32
5.1	Methodik	32
5.1.1	Gesteinsmagnetik	32
5.1.2	Paläomagnetik	32
5.1.3	Datenverarbeitung	34
5.2	Messungen und Ergebnisse	37
5.2.1	Northern Volcanic Field	37
5.2.2	Nusab el Balgum	45
5.2.3	Sabaloka	53
5.2.3.1	Geologie	53
5.2.3.2	Paläomagnetik Vorarbeiten	55
5.2.3.3	Beprobung	57
5.2.3.4	Paläomagnetik	59
5.2.3.5	Gesteinsmagnetik	67
5.2.3.6	Interpretation	70
5.2.4	Nabati	72
5.2.5	Bir Safsaf	79
5.2.6	Kadaweb	87
5.2.7	Weitere Ergebnisse	94
6.0	<u>Diskussion und Ausblick</u>	109
6.1	Diskussion der Ergebnisse	109
6.2	Ausblick	118
7.0	<u>Zusammenfassung</u>	120
Anhang:		
	Glossar	122
	Kleiner Sprachführer	123
	Literaturverzeichnis	124
	Danksagung	130
	Lebenslauf	131
	Nachtrag	132

1.0 Vorwort

1.1 Einleitung

Zu Beginn dieses Jahrhunderts wurde von A.WEGENER (1915) die Kontinentalverschiebungshypothese aufgestellt: Die Kontinente bewegen sich lateral als größere Schollen. Diese damals revolutionäre Idee konnte sich nicht allgemein durchsetzen, vor allem weil die Frage nach den Antriebskräften und Mechanismen offen war.

Erst die Entdeckung der mittelozeanischen Rücken durch HEEZEN im Jahre 1958 (HEEZEN, 1962) sowie des magnetischen Streifenmusters der Ozeanböden (DIETZ, 1961; HESS, 1962) und das daraus abgeleitete Modell des "Sea Floor Spreading" (VINE UND MATTHEWS, 1963) führten zur Wiederbelebung der Wegener'schen Idee in Form der Theorie der Plattentektonik:

Die Lithosphäre, die Erdkruste zusammen mit dem obersten Teil des Erdmantels, ist in Platten aufgeteilt, deren Ränder durch aktive Erdbebenzonen definiert sind. Die Lithosphärenplatten bewegen sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Richtung auf einer plastischen Schicht, der Asthenosphäre.

Die Paläomagnetik spielte und spielt eine Schlüsselrolle bei dem Nachweis und bei der Rekonstruktion der Bewegung dieser Platten. Aus dem in Gesteinen als Natürliche Remanente Magnetisierung (NRM) fossil erhaltenen Erdmagnetfeld, dem Paläofeld, können quantitative Angaben über die frühere Position kontinentaler und ozeanischer Krustenblöcke abgeleitet werden. Die Richtung der remanenten Magnetisierung und die geographischen Koordinaten des Gesteines bestimmen die sogenannte scheinbare Paläopollage - die ehemalige Pollage bezüglich des Untersuchungspunkts in seinen heutigen Ortskoordinaten. Eine zeitliche Folge von Paläopolen für einen Krustenblock, der in der betrachteten Zeit eine zusammenhängende Einheit darstellte, bildet die scheinbare Polwanderkurve (APWP: "Apparent Polar Wander Path") dieses Blocks. Die Deklination und Inklination der remanenten Magnetisierung können als Indikator für Drehungen und Bewegungen unter Änderung der geographischen Breite interpretiert werden.

Andere Hinweise, wie geologische Klimaindikatoren (z.B. Ver-

eisungsspuren) und die ehemaligen Flora- und Faunaverteilungen, stützen diese Plattenrekonstruktionen.

Aus dem Vergleich der Polwanderkurven von Südamerika, Afrika, Indien, Australien und Antarktis weiß man, daß der Südkontinent Gondwana in der Trias vor ca. 200 Ma auseinandergebrochen ist. Die Bruchstücke driften seitdem mit Geschwindigkeiten von mehreren cm pro Jahr auseinander.

Es lassen sich folgende Grundtypen von Plattenrändern unterscheiden: Divergente, wie z.B. der mittelatlantische Rücken, an denen neue Kruste entsteht, konvergente mit Kontinent-Kontinent Kollision (z.B. Himalaya) und Kontinent-Ozean Kollision (z.B. Anden) sowie Transformverwerfungen, wie z.B. in Kalifornien an der San Andreas Störung. Durch diese Einteilung ist es den Erdwissenschaftlern gelungen, die an den Plattenrändern stattfindenden geologischen Prozesse zu erklären.

Während man früher glaubte, daß die Effekte der Platteninteraktion nur auf die Plattenränder beschränkt sei, hat man jetzt viele Anhaltspunkte, daß Deformation, magmatische Aktivität und Metamorphose auch in beträchtlichen Entfernungen von den Rändern ausgelöst werden können. Doch ein genaues Verständnis dieser Intraplatteneffekte fehlt heute noch.

1.2 Stand der Forschung

Paläomagnetische Untersuchungen in Afrika haben in Anbetracht der jungen Wissenschaft eine lange Tradition, beginnend mit Arbeiten initiiert von HALES und GOUGH in Südafrika und Rhodesien, dem heutigen Zimbabwe (GOUGH, 1956; GRAHAM und HALES, 1961; GOUGH und VAN NIEKERK, 1959). Die Paläomagnetik-Arbeitsgruppe am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik in München ist seit über 10 Jahren in Afrika tätig (z.B.: SCHULT u. SOFFEL, 1973; SCHULT, 1974; SCHULT et al., 1978; HUSSAIN et al., 1979; SCHULT et al., 1981).

Eine erste Zusammenfassung von Ergebnissen aus Afrika wurde von McELHINNY et al. (1968) in den Reviews of Geophysics veröffentlicht. Weitere Listen wurden später periodisch im Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society veröffent-

licht. Den momentan aktuellsten Überblick der Paläomagnetik in Afrika geben BROCK (1981) sowie IRVING und IRVING (1982). BROCK listet alle verfügbaren Pole bis 1978 auf, die gewisse Mindestkriterien ähnlich denen McELHINNYs (1973) erfüllen. IRVING und IRVING kompilieren alle Polpositionen aus dem Altersbereich 0 bis 290 Ma mit Stand 1982.

Für die Zeit des Bestehens des Südkontinents Gondwana vom oberen Mesozoikum bis zurück ins obere, sehr wahrscheinlich auch untere Paläozoikum (SMITH u. HALLAM, 1970) können Paläomagnetik-Ergebnisse aus den Gondwana-Bruchstücken Südamerika, Afrika, Madagaskar, Antarktis, Australien und Indien zusammengefaßt werden. Üblicherweise werden dazu die einzelnen Teilstücke in ihre Position vor dem Auseinanderdriften zurückgedreht (Eulersche Rotation). Dabei wird Afrika im heutigen Referenzsystem festgehalten. Dasselbe Zurückdrehen wird mit den Pollagen durchgeführt, womit Polpositionen verschiedener geographischer Provenienz vergleichbar werden. Eine Kompilation dieser Gondwana-Poldaten geben McELHINNY und EMBLETON (1976), IRVING (1977), MOREL und IRVING (1978) für das untere Phanerozoikum und das Proterozoikum, DAVIES et al. (1980) für das späte Präkambrium bis mittleres Paläozoikum und VAN HOUTEN und HARGRAVES (1986) für das Paläozoikum.

In Abbildung 1 ist die scheinbare Polwanderkurve (APWP) Afrikas nach SOFFEL (1984) für die Zeit von rezent bis zum Karbon dargestellt. Die Abbildungen 2 bis 5 zeigen verschiedene Vorschläge für den Verlauf der Polwanderkurve Gondwanas im Paläozoikum, Abbildung 6 zeigt 3 Vorschläge für das obere Präkambrium bis zum Paläozoikum (nach DAVIES et al., 1980). Das frühe und mittlere Präkambrium sollen hier nicht betrachtet werden.

Trotz einer starken Zunahme paläomagnetischer Ergebnisse aus Afrika in den letzten Jahren bleiben viele offene Fragen.

Der Verlauf der APWP Gondwanas im mittleren Paläozoikum ist noch völlig ungeklärt: "The single greatest uncertainty in any Siluro-Devonian reconstruction is the position of the supercontinent Gondwana. The middle Palaeozoic portion of the apparent polar wander path for Gondwana is poorly constrained, and several alternative paths have been proposed." (SCOTese et al., 1985).

Hier ist die Paläomagnetik die einzig erfolgsversprechende Methode, einer Klärung der Paläogeographie näherzukommen.

Auch im Mesozoikum und Känozoikum bleiben Datenlücken: "Many gaps remain however, and a much higher density of data will be required" (BROCK, 1981), "There is no record for about 40 Ma during the latest Cretaceous and Paleocene" und "... the transition appears to have occurred mainly during the Permian, but there may be a gap of as much as 25 Ma in the record..." (IRVING und IRVING, 1982).

Nach dem Klassifikationsschema zur Beurteilung der Güte paläomagnetischer Daten von McELHINNY und EMBLETON (1976) wird der Pollagen- wie der Altersbestimmung gleiches Gewicht zugemessen und die Qualität beider Bestimmungen auf einer Skala von 0 bis im besten Fall 3 eingestuft. Die Güte der existierenden Daten ist oft noch nicht von befriedigender Qualität und nur wenige Pole sind als Schlüsselpole geeignet: "In a list of 23 poles from Africa for the period 400 Myr to 1000 Myr McElhinny and Embleton find only one pole of (3+3) standard" (BROCK, 1981).

Die regionale Herkunft afrikanischer Pole ist ungleich. Nur sehr spärlich existieren präkänozoische Daten aus dem Bereich des Ostsaharakratons (siehe dazu Tabelle I).

1.3 Fragestellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die paläomagnetische Datenbasis für Afrika zu erweitern: Paläopolbestimmungen aus dem Arbeitsgebiet Südwest-Ägypten und Nord-Sudan werden durchgeführt und für den Ostsaharakraton eine eigene Polwanderkurve erstellt. Schwerpunkt dabei ist es, den Verlauf der paläozoischen APWP besser festzulegen. Abschließend soll der Versuch unternommen werden, mögliche Zusammenhänge zwischen der geologischen Entwicklung des Arbeitsgebiets und der Driftgeschichte Afrikas, wie sie sich aus der Polwanderkurve ergibt, aufzuzeigen. Dazu siehe die Kapitel 5 und 6.

Um diese Ziele zu erreichen, bedarf es mehrerer Einzelschritte:
- Geeignete Arbeitsgebiete und Lithologien werden ausgesucht und

beprobt. Dazu siehe Kapitel 3.

- Paläo- und gesteinsmagnetische Verfahren werden angewandt, um Paläopolpositionen zu bestimmen und Aussagen über die Entstehungsgeschichte der Magnetisierung und die Verlässlichkeit der Paläopole zu treffen. Dazu siehe die Kapitel 4 und 5.

- Um die Messung, Auswertung und Darstellung einer großen Zahl von Proben verlässlich und hinreichend schnell durchführen zu können, bedarf es des Einsatzes automatisierter Datenverarbeitung. Das bestehende Meßerfassungssystem war zu verbessern und zu erweitern, so daß die gesamte Datenaufbereitung wie Datenkorrekturen, statistische Auswerteverfahren und graphische Darstellungen von dem Verbund Computer-Drucker-Plotter ausgeführt werden können. Dazu siehe Kapitel 5.

Tabelle I: Liste präkänozoischer Paläopole aus dem Bereich des Ostsahara-Kratons (nach BROCK, 1981 sowie neuere Arbeiten).

Region	Gesteinseinheit	Alter	Referenz
Ägypten	Wadi Matash Vulkanite	oKreide	Schult et al., 81
Ägypten	Nubische Serie	oKreide ?	El Shazli u. Krs, 73
Ägypten	Syenit, östl. El Oweinat	oKreide	Hussain et al., 83
Ägypten	Nubische Serie	oKreide ?	" " " "
Ägypten	Abu Khrug Ring Komplex	oKreide	Ressetar et al., 81
Ägypten	Gänge Qena-Safaga, Um Rus	480-530 Ma	Davies et al., 88
Ägypten	Dokhan Vulkanite	603 Ma ?	" " " "
Niger	Air Ring Komplex	400 Ma ?	Hargraves u. Dawson, 86

ABB. 1

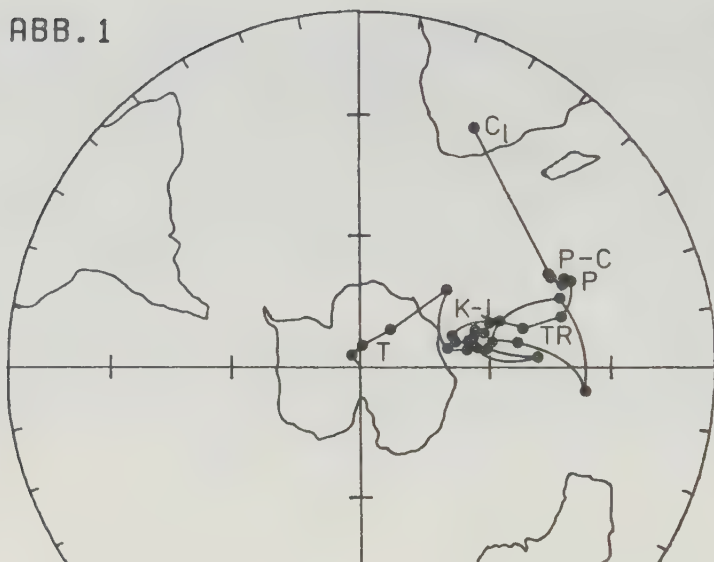


Abb.1: APWP Afrikas für die Zeit Karbon bis rezent. Dargestellt ist, wie für Afrika üblich, der Verlauf der Südpole (nach SOFFEL, 1984). Cl=Unterkarbon, P-C=Permokarbon, P=Perm, Tr=Trias, K-J=Kreide-Jura, T=Tertiär

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb.2 bis 5: 4 Vorschläge für den APWP-Verlauf Gondwanas im Paläozoikum. Dargestellt sind Südpole (nach LIVERMORE et al., 1985). Abb.2 nach McELHINNY u. EMBLETON, 1974; Abb.3 nach SCHMIDT u. MORRIS, 1977; Abb.4 nach MOREL u. IRVING, 1978 und Abb.5 nach GOLEBY, 1980.

Abb.6: 3 Vorschläge für den APWP-Verlauf Gondwanas im späten Präkambrium und frühen Paläozoikum. Dargestellt ist der Verlauf der Südpole (nach DAVIES et al., 1980). Pfad 1 nach McELHINNY u. EMBLETON 1976; Pfad 2 nach MOREL u. IRVING, 1978; Pfad 3 nach HAILWOOD, 1972. Nur sehr grobe Altersangaben sind möglich (PC: Präkambrium; C: Kambrium; O: Ordovizium)

ABB. 2

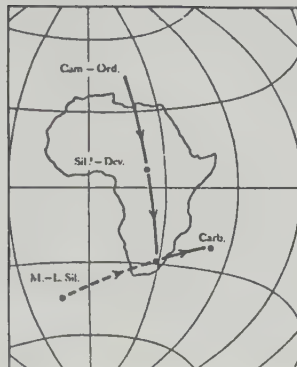


ABB. 3

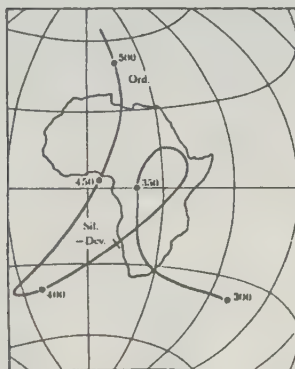
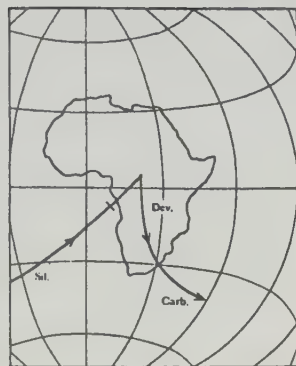


ABB. 4

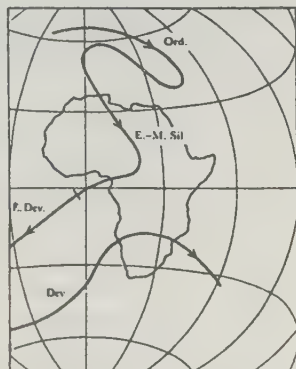
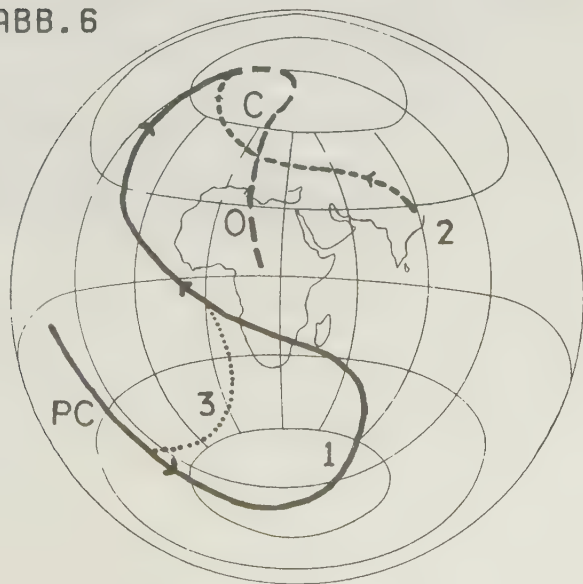


ABB. 5

ABB. 6



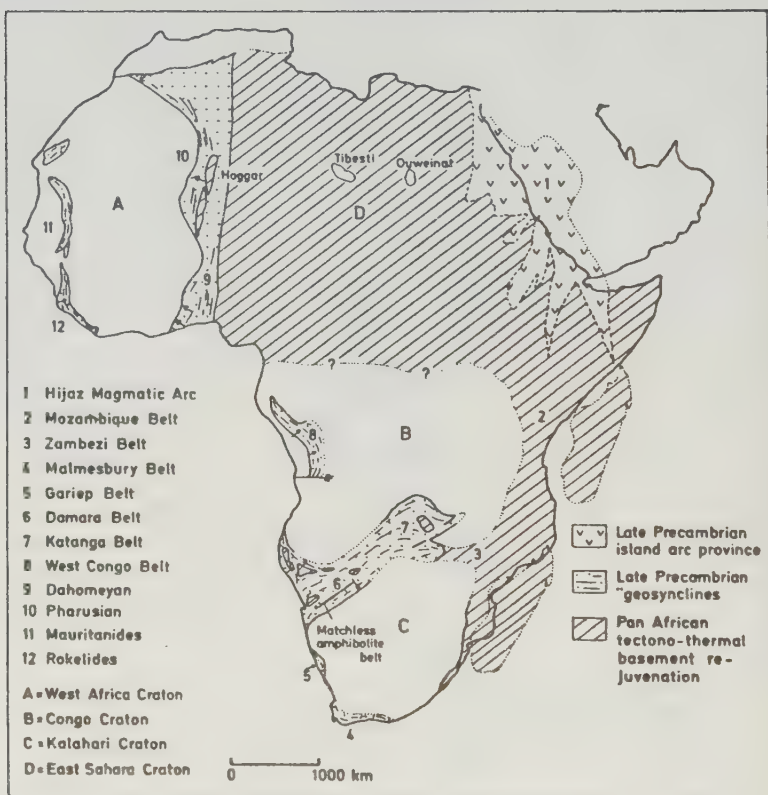


Abb.7: Vereinfachte tektonische Karte Afrikas (nach KRÖNER, 1979). Die 4 Kratongebiete (Westafrika-Kraton, Kongo-Kraton, Kalahari-Kraton und Ostsahara-Kraton) werden von panafrikanisch aktivierten Gürteln umgeben. Der Ostsaharakraton wurde während der Panafrikanischen Episode thermisch überprägt.

2.0 Geologie

2.1 Überblick

Im folgenden werden der geologische Rahmen abgesteckt und für die Methode der Paläomagnetik wichtige Sachverhalte und Konsequenzen herausgestellt. Für eine detaillierte Behandlung sei auf die Literatur verwiesen (WHITEMAN, 1971 und SAID, 1962). Eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsgebiete erfolgt weiter unten in Abschnitt 5 in Zusammenhang mit den Messungen zu den einzelnen Lokalitäten.

Der Afrikanische Kontinent läßt sich großräumig in Bereiche stabiler kratonaler Kruste und in dazwischenliegende Faltungsgürtel ("mobile belts") gliedern (siehe Abb. 7). Diese Gürtel wurden während der panafrikanischen Episode, der jüngsten über ganz Afrika wirksamen Tektogenese, vor ca. 1100 bis 500 Ma entwickelt. Das Untersuchungsgebiet in Südwest-Ägypten und Nord-Sudan befindet sich im östlichen Grenzbereich des Ostsaharakratons.

Der Ostsaharakraton (KRÖNER, 1979) wird im Westen von Faltungsgürteln begrenzt: Durch die panafrikanische Kollision des Ostsaharakratons mit dem Westsaharakraton wurde der dazwischenliegende Ozean oder Graben geschlossen (BERTRAND et al., 1978) und das Pharusische sowie Dahomeyische Orogen gebildet.

Im Osten des Ostsaharakratons fand währenddessen, bedingt durch westwärts gerichtete kontinuierliche Subduktion ozeanischer Kruste, eine Akkretion neuer Kruste statt.

Der genaue Verlauf der Ost- und Südgrenze des Ostsaharakratons kann bis jetzt nicht festgelegt werden und wird durch den Hijaz Magmatic Arc und die nördliche Verlängerung des tektono-thermischen Mozambique-Gürtels nur angedeutet.

Der starre Block des Ostsaharakratons, eingeklemmt zwischen den panafrikanischen, mobilen Zonen hat starke Intraplatten-Tektonik (KRÖNER, 1979) erfahren. Die damit verbundene Bildung großräumiger Bruchsysteme war begleitet von Intrusionen durch Granitplutone und Alkali-Ringkomplexe. Als Ergebnis der panafrikanischen Tektogenese wurden die älteren Gesteine der Kruste in ihrer Struktur verändert und thermisch überprägt. Schließlich

intrudierten posttektonische Granite das ganze Gebiet zwischen Hoggar Gebirge und Rotem Meer.

Im Phanerozoikum ereigneten sich epirogenetische Bewegungen - großräumige Krümmungen der Kruste - die zur Anlage intrakratonaler Becken führten. Das alte Bruchsystem wurde phasenweise reaktiviert und damit zeitlich wie räumlich verbunden kommt es zur Extrusion und Intrusion magmatischer Gesteine, wie z.B. von anorogenen Alkali-Ringkomplexen.

2.2 Ringkomplexe

Bei vielen der beprobten Lokalitäten handelt es sich um Alkali-Ringkomplexe. Der Begriff "Ringkomplex" ist weniger ein genetischer als ein deskriptiver Begriff:

Im wesentlichen sind Ringkomplexe eine petrologisch variable, strukturell eindeutig bestimmte Gruppe von hypabyssisch oder subvulkanischen, magmatischen Intrusionen, die vollständige oder partielle Ringdykes (Ringgänge) und Cone Sheets umfassen. Aufgeschlossen sind sie in bogenartigen, runden, polygonalen oder elliptischen Formen mit Durchmessern, die von 1 bis 30 km und mehr reichen (BOWDEN, 1985). Die Mehrheit der Ringkomplexe stellen die erodierte Wurzel von Vulkanen und ihren Calderen dar. Afrikanische Ringkomplexe können petrographisch und geochemisch in mehrere Klassen eingeteilt werden, basierend auf Farbindex, Silikatgehalt u.a..

In dieser Arbeit sind allein die Alkali-Ringkomplexe von Bedeutung. Sie sind typisch für rein intrakontinentalen, anorogenen Magmatismus. Ihre geodynamische Bedeutung wird kontrovers diskutiert zwischen Anhängern der Plume Theorie (MORGAN, 1972 u. GASS et al., 1978), die den Magmaursprung in Mantelplumes sehen, und Vertretern einer reinen Steuerung durch die Lithosphärenstruktur mit Magmaerzeugung durch Scherprozesse mit Wärmefreisetzung an der Lithosphärenbasis ("shearheating") (de GRUYTER und VOGEL, 1981) oder Druckentlastung ("pressure release") (BAILEY, 1964; LAMEYRE und BONIN, 1978; BLACK et al., 1985).

Festzustehen scheint, daß das Auftreten der Alkali-Ringkomplexe an den Magmaaufstieg von einer Quelle in der Asthenosphäre

entlang aktivierter Brüche der Lithosphäre gebunden ist.

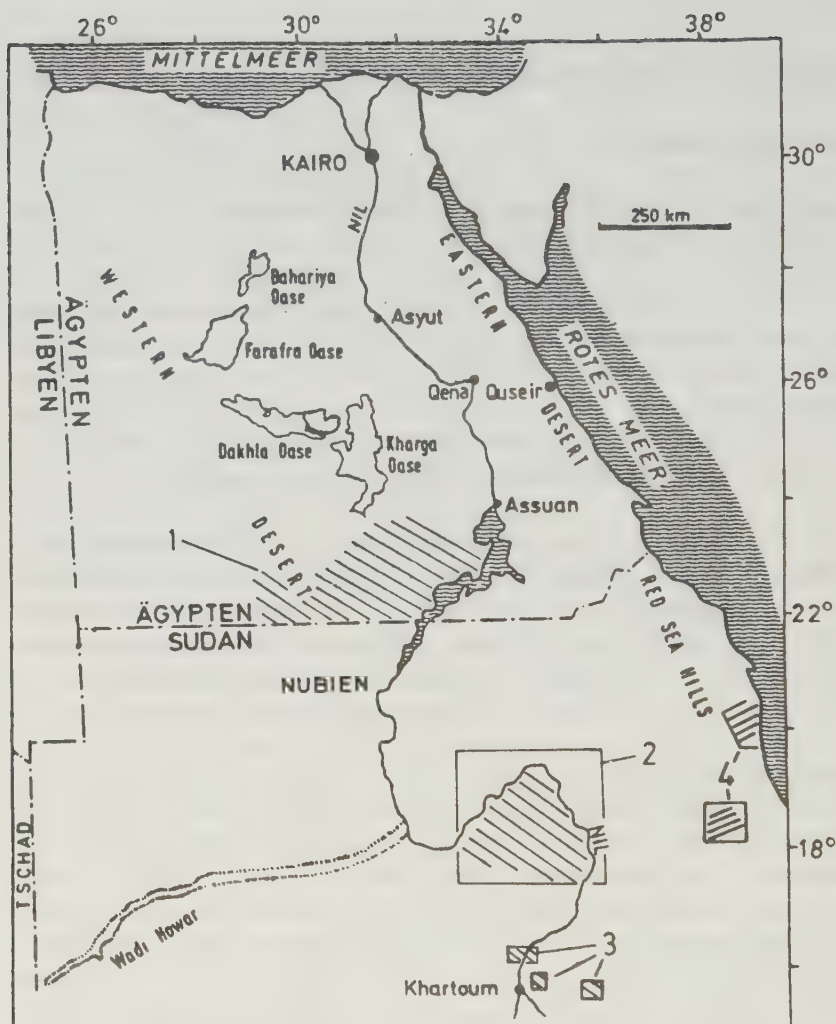
2.3 Schlußfolgerungen

Für paläomagnetische Untersuchungen im Arbeitsgebiet ergeben sich 3 wichtige Schlußfolgerungen:

- die 4 kratonalen Bereiche Afrikas scheinen spätestens seit dem Ende der Panafrikanischen Episode an der Wende Präkambrium zu Kambrium fest aneinandergeschweißt zu sein. Das bedeutet für das Phanerozoikum, daß paläomagnetische Ergebnisse, Paläopole, aus allen Kratonbereichen miteinander verglichen und zu einer gesamt afrikanischen Polwanderkurve zusammengefaßt werden können.

- Bei paläomagnetischen Untersuchungen an Präkambrischen Gesteinen ist mit Schwierigkeiten zu rechnen. Es muß erwartet werden, daß durch thermische Überprägung während der Panafrikanischen Episode Gestein teilweise oder vollständig remagnetisiert wurde, d.h. die primäre, syngenetische Magnetisierung wurde von einer sekundären, postgenetischen Magnetisierung verdrängt.

- Alkali-Ringkomplexe als Intraplatten-Indizien für Vorgänge, die sich an Plattenrändern ereignen, sind ausgezeichnete Objekte für paläomagnetische Studien zur Rekonstruktion vergangener Plattenbewegungen. Sie enthalten jedoch aufgrund ihres oft sauren Chemosismus nur in sehr geringem Umfang magnetische Mineralien. Dies kann eine Messung der Magnetisierung erschweren bzw. unmöglich machen.



ARBEITSGBIETE:

- 1 SW-ÄGYPTEN
- 2 BAYUDA
- 3 um KHARTUM
- 4 RED SEA HILLS

Abb.8: Übersichtskarte mit den 4 Beprobungsgebieten in der Libyschen oder Westlichen Wüste (Südwest-Ägypten), der Bayuda-Wüste, dem Gebiet um Khartum und den Red Sea Hills. Die beprobten Lokationen sind in den detaillierteren Abb. 9 bis 11 dargestellt.

3.0 Geländearbeit

3.1 Arbeitsbedingungen

Die Geländearbeit in Ägypten und Sudan fand unter folgenden Bedingungen statt:

Das Arbeitsgebiet liegt in der östlichen Sahara (Abb.8), dem trockensten Landgebiet der Erde. Hier könnte die einfallende Sonnenstrahlung das 200-fache des tatsächlichen Regenfalls verdunsten (HENNING et al., 1977).

Regenfälle sind in der Libyschen Wüste Südwest-Ägyptens extrem selten und es können Jahre vergehen ohne Regen. Erst seit Bau des Assuan-Staudamms kommt es jetzt öfter in dessen Nähe zu Unwettern mit Regenfällen. In der Bayuda Wüste in Nord-Sudan schwankt der mittlere jährliche Niederschlag zwischen 75 mm (Atbara) und 25 mm (Abu Hamed) und weniger. Die kurze Regenzeit zwischen Juli und September ist auf 3 bis 5 Tage beschränkt und normalerweise lokal begrenzt. Nur in Ausnahmefällen ereignen sich heftige Regengüsse. Erst in der Butana-Tonebene östlich von Khartum und in dem Gebirge des Roten Meers kommt es öfter zu Regenfällen.

Wasser für Eigenbedarf und zur Probenentnahme kann nur an wenigen Stellen (Tiefbrunnen, Nil) aufgenommen werden und muß dann über lange Strecken mitgenommen werden.

Die mittleren Tageshöchsttemperaturen schwanken zwischen 30°C und 43°C für Atbara und 35°C bis 52°C für Wadi Halfa. Körperliche Arbeit im Freien um die Mittagszeit ist daher unmöglich.

Starke Winde blasen über das ganze Jahr, im Winter anschwellend zu den von Norden kommenden Stürmen ("kau ketir"), die den Sand vom Boden aufwehen und Sanddünen fortbewegen. Im Sommer kommt es zu wirklichen Sandstürmen ("haboob"), die Sand und Staub bis in die obere Atmosphäre aufwirbeln. Sie verdunkeln die Sonne und bewirken plötzlichen Temperaturabfall.

Aufgrund der extremen klimatischen Bedingungen ist Geländearbeit nur in der Zeit zwischen Ende September und Mitte April möglich.

Die Weitläufigkeit des Gebiets in Zusammenhang mit dem fast völligen Fehlen von Straßen bereitet zusätzlich Probleme. Sogenannte Hauptverbindungsrouen sind oft nur holprige Pisten. Diese

sowie das Gelände fernab jeglicher Fahrspuren sind nur, wenn überhaupt mit Geländefahrzeugen passierbar. Tankmöglichkeiten unterwegs gibt es nicht, der gesamte Treibstoff muß mitgeführt werden.

Die zweite Beprobungsfahrt in den Sudan im Herbst 1985 fiel in eine Zeit der politischen Instabilität. Nach dem Sturz Numeris kam es zu Störungen in den Beziehungen zwischen Ägypten und Sudan. Eine geplante Beprobung der Ringkomplexe südlich von Wadi Halfa, nahe der Grenze zu Ägypten, mußte deshalb abgesetzt werden.

Die aufgeführten Tatsachen machen klar, daß eine Auswahl der Beprobungspunkte ausschließlich nach wissenschaftlichen Kriterien nicht durchführbar war.

3.2 Verfügbarkeit geologischer Daten

Die Geländearbeit fand in wenig erforschem Gebiet statt. Grundlegende geologische und geographische Vorarbeiten sind oft nur unvollständig durchgeführt: Für den Südteil der Libyschen Wüste kann man sich nur auf Satellitenbilder und erste vorläufige, auf Bildauswertung beruhenden Karten und Kartierungen stützen.

Die für den Paläomagnetiker wichtigen Informationen, wie geologische Alter, Beschreibung der vorhandenen Lithologie, tektonische Lage und geologische Geschichte, sind noch nicht oder nur unvollständig bekannt. Geeignete Karten zur Orientierung im Gelände und Dokumentation der Lage von Beprobungspunkten stehen nur selten zur Verfügung.

3.3 Auswahlkriterien

Aus der Reihe der potentiellen Beprobungsloktionen wurden die Arbeitsgebiete neben den bereits oben angesprochenen Kriterien, Zugänglichkeit und Logistik, nach den wissenschaftlichen Gesichtspunkten, wie sie in Kapitel 1 unter Stand der Forschung und Ziel der Arbeit genannt wurden, ausgewählt.

Dazu mußten die vorliegenden radiometrischen Altersdaten auf

ihre Qualität und Aussagekraft bezüglich der Paläomagnetik überprüft werden.

Erst vor Ort konnten wichtige Fragen, wie Verwitterungszustand, Aufschlußverhältnisse und in-situ Lage des Materials, angesprochen und entschieden werden, ob und, wenn ja, wie und in welchem Umfang sich eine Beprobung lohnt.

Basalte in ariden Klimaten haben die Tendenz zu sanften, niedrigen Hügeln zu verwittern. Hier kann die Suche nach beprobaren Blöcken langwierig und nicht immer erfolgreich sein und die Entscheidung, ob in-situ Material vorliegt oder ob es schon zu leichten Verkippungen gekommen ist, kann oft nicht mit völliger Bestimmtheit getroffen werden. Dazu siehe auch die Ergebnisse von den Tushka Basalten.

Rezente wie auch alte Verwitterungen stellen ein besonderes Problem bei der Beprobung in tropischen und subtropischen Gebieten dar. Hier können verwitterte Decklagen sehr dick werden und das Gestein somit für die Paläomagnetik-Beprobung unerreichbar machen. Chemische und mechanische Verwitterungsprozesse sind stark wirksam. Doch es fehlt das Transportmedium, die Verwitterungsschicht und den Schutt fortzutransportieren. Straßeneinschnitte, Steinbrüche und Minen andererseits stehen nur äußerst selten zur Verfügung. So bereitet es erhebliche Schwierigkeiten, den störenden Oberflächenerscheinungen, wie Verwitterung, Blitzschlagmagnetisierung und Stresseffekten durch thermische Beanspruchung (IRVING, 1964), aus dem Weg zu gehen. Dies wird im Abschnitt 5 über die Messungen und Ergebnisse weiter dokumentiert.

3.4 Beprobung

In 3 Geländefahrten im Frühjahr 1984, Herbst 1984 und Herbst 1985 wurden 16 Arbeitsgebiete aufgesucht und beprobt. Die Lokalisationen sind mit Angaben über Alter, geographische Lage, Lithologie sowie Art und Umfang der Beprobung in den Tabellen II, III und IV aufgelistet und in den Übersichtskarten 9, 10 und 11 eingezeichnet.

Störeffekte können u.a. durch die Säkularvariation oder durch eventuell vorhandene Kleintektonik verursacht werden. Um diese herauszumitteln und um Meßfehler bei der Orientierung im Gelände oder bei der Arbeit im Labor entdecken zu können, wird nach folgender hierarchischer Struktur verfahren:

- LOKALITÄT ist das Arbeitsgebiet, z.B. ein Ringkomplex oder eine Basaltdecke, von dem mehrere Vorkommen beprobt werden. Aus den mittleren Richtungen und/oder Pollagen der einzelnen Vorkommen wird für die Lokalität ein Gesamtmittel errechnet, das von den oben genannten Störungen frei sein sollte.

- VORKOMMEN: Gesteinsmaterial, von dem angenommen wird, daß es in etwa gleichzeitig magnetisiert wurde, z.B. eine dünne Lavalage oder ein Gang. Der Paläopol, der aus der über ein Vorkommen gemittelten Richtung errechnete wurde, wird Virtueller Geomagnetischer Pol (VGP) genannt; er kann noch mit den oben genannten Störeffekten behaftet sein.

- KERNE oder Handstücke sind individuell orientierte Materialstücke, sie liefern mehrere

- PROBEN, die als individuelle Einheiten vermessen werden.

Für eine verlässliche Paläopolbestimmung müssen bei der Beprobung folgende Bedingungen erfüllt sein: 8 unabhängig orientierte Proben nennt McELHINNY (1973) als Mindestkriterium. 1976 führen McELHINNY und EMBLETON ein Klassifikationsschema für Paläopole ein. Für einen Schlüsselpol fordern sie u.a., daß er auf mindestens 4 Vorkommen und 15 Proben beruht. Diese Bedingung verschärfen BRIDEN und DUFF (1981) mit der Forderung nach mindestens 7 Vorkommen. Diese Bedingungen an die Probensammlung stellen einen Kompromiß dar zwischen der Forderung nach einer möglichst breiten Datenbasis und dem Aufwand an Zeit, Arbeit und Material, um diese Kollektion anzulegen.

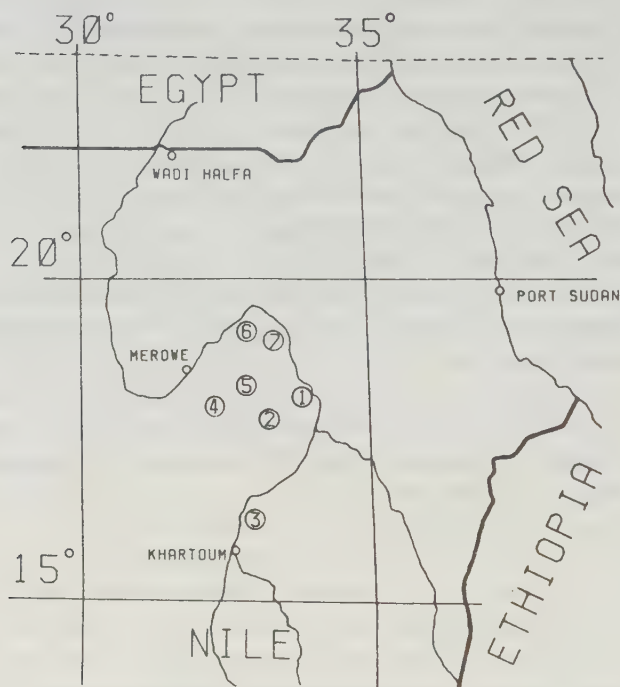
Die Entnahme der Proben erfolgte im Normalfall mit einer tragbaren Diamant-Kernbohrmaschine mit Wasserkühlung. Die gezogenen Kerne haben einen Durchmesser von 2.5 cm und eine Länge von bis zu 10 cm. Unter bestimmten Umständen, wie Wasserknappheit, Unzugänglichkeit des Geländes und Zeitmangel, konnten nur orien-

tierte Handstücke gesammelt werden. Die Orientierung der Kerne bzw. der Handstücke erfolgte mittels Wasserwaage, Magnetkompaß und, wo nötig mit dem Sonnenkompaß. Die Kerne wurden dann im Labor in Standardproben von 2.2 cm Länge gesägt und folgendermaßen beschriftet: An erster Stelle die Nummer des Vorkommens, an zweiter die Kernnummer und an dritter die Probennummer im Kern, die von innen nach außen gezählt wird. Bei Handstücken wird nach der ersten Stelle die Handstücknummer eingeschoben. An den Proben wird durch einen Pfeil, der in die $+z'$ -Richtung weist, ein internes Koordinatensystem mit den Achsen x' , y' und z' definiert. Die probeninterne $+z'$ -Richtung zeigt dabei in Bohrrichtung in den Gesteinskörper hinein.

Durch die Kern- oder Geländekorrektur können mit den bei der Probenentnahme bestimmten Kern- bzw. Handstück-Orientierungsdaten die Messwerte von dem probeninternen System in das geographische System umgerechnet werden.

Für die Arbeitsgebiete wurden die Richtungen des Erdmagnetfelds mittels Dipolformel (z.B. KERTZ, 1969) berechnet. Einmal wurde dabei von der Annahme eines axialen Dipols im Erdmittelpunkt, zum anderen wurde vom gegenwärtigen Dipolfeld mit einem arktischen geomagnetischen Pol bei 78.5°N und 291°E (VOPPEL, 1984) ausgegangen. Dies ist in Tabelle V aufgelistet. Sofern bekannt, wurde die aktuelle Erdfeldrichtung hinzugefügt.

GELÄNDEARBEIT FRÜHJAHR 1984

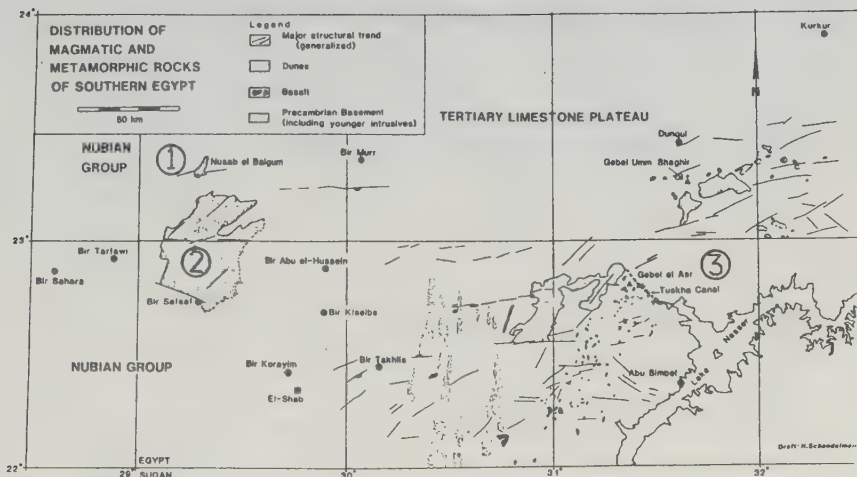


- | | |
|------------|-------------------|
| 1 NABATI | 5 ABU NAHAL |
| 2 SINGEIR | 6 RAZAM AL ATSHAN |
| 3 SABALOKA | 7 N.VOLC.FIELD |
| 4 MUSRAN | |

TAB. II

Geländearbeit in N-SUDAN im Frühjahr 1984

Lokalität	Lat/Long in °	Alter (Ma)	Z a h l der			Lithologie
			Vork.	Handstücke	Kerne	
NABATI	18.10 33.70	573±70	10	--	83	Granit
SINGEIR	18.03 33.50	433± 3	10	8	16	Granit
SABALOKA	16.30 32.60	399± 7	8	1	64	Rhyolit, Lava
MUSRAN	18.15 32.73	396± 3	9	--	87	Granit, Rhyolit
ABU NAHAL	18.55 33.01	238± 2	11	6	45	Granit, Rhyolit
RAZAM ALATSHAN	19.12 33.12	165± 8	9	1	78	Syenit, Trachyt
N.VOLC.FIELD	19.00 33.30	65	8	4	54	Basalt



1 NUSAB EL BALGUM 216 ma 3 TUSHKA
2 BIR SAESAF

TAB. III

Geländearbeit in SW-ÄGYPTEN im Herbst 1984

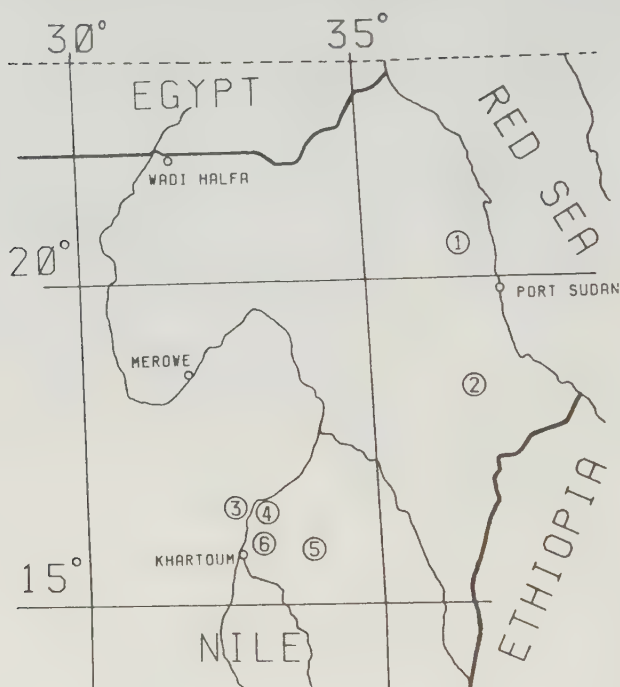
Lokalität	Lat/Long in °	Alter (Ma)	Vork.	Z a h l der Handstücke	Kerne	Lithologie
BIR SAFAF	23.10 29.33	520	7	26	--	Porphyrit
MUSAB EL BALGUM	23.31 29.33	216± 5	10	8	50	Subvulkanite
TUSHKA	22.75 31.50	90	10	(3)	90	Basalte

Abb.9 u. Tab.II (gegenüberliegende Seite): Beprobungsfahrt Frühjahr 1984 im N-Sudan: Übersichtskarte und Tabelle mit Angaben zu den Lokationen (Siehe auch Abb.8).

Abb.10 u. Tab.III: Beprobungsfahrt Herbst 1984 in SW-Ägypten:
Übersichtskarte und Tabelle mit Angaben zu den Lokationen (Siehe auch Abb.8).

Abb.11 u. Tab.IV (folgende Seite): Beprobungsfahrt Herbst 1985 im N-Sudan: Übersichtskarte und Tabelle mit Angaben zu den Lokationen (Siehe auch Abb.8).

GELÄNDEARBEIT HERBST 1985



- | | |
|-----------|------------|
| 1 KADAWEB | 4 SABALOKA |
| 2 TEHILLA | 5 QEILI |
| 3 TULEIH | 6 SILEITAT |

TAB. IV

Geländearbeit in N-SUDAN im Herbst 1985

Lokalität	Lat/Long in °	Alter (Ma)	Vork.	Z a h l der Handstücke	Kerne	Lithologie
KADAWEB	20.08 36.33	720	2	--	16	Gabbro
TEHILLA	17.70 36.10	650	12	--	99	Gabbro, Basalt, Adamellit
TULEIH	16.42 32.83	465±14	11	--	86	Syenit, Gänge
SABALOKA	16.30 32.60	399± 7	23	--	209	Granit, Rhyolit, Ignimbrite etc.
QEILI	15.50 33.75	Pz?	11	--	90	Syenite, Gänge, Gabbro
SILEITAT ES SUFR	15.83 32.62	165	7	--	55	Granit, Syenit

Tabelle V: Liste der Richtungen des axialen Dipolfelds, des gegenwärtigen Dipolsfelds mit einem arktischen geomagnetischen Pol bei 78.5°N u. 291°E (VOPPEL, 1984) und des heutigen Erdfelds für die wichtigsten Arbeitsgebiete:

Arbeitsgebiet	axiales Dipolfeld ¹⁾	aktuelles Dipolfeld		heutiges Erdfeld	
	Inkl(°)	Dekl(°E)	Inkl(°)	Dekl(°E)	Inkl(°)
Nusab el Balgum	40.7	347.8	37.8	1.6	30. ²⁾
Bir Safsaf	40.5	347.8	37.5	1.6	30. ²⁾
Kadaweb	36.2	348.4	30.9	1.5 ⁴⁾	
Nabati	33.6	348.4	29.1	1.5	22. ³⁾
N.Volc. Field	34.5	348.3	30.1	1.5	22. ³⁾
Qeili	29.0	348.5	24.2		
Sabaloka	30.3	348.4	26.0	1.2	20. ⁴⁾
Sileitat	29.5	348.4	25.1		
Tehilla	32.7	348.5	27.3		
Tuleih	30.3	348.4	26.0	1.2	20. ⁴⁾
Tushka	39.9	348.0	36.4		

¹⁾: Die Deklination ist hier für alle Punkte gleich Null

²⁾: Mittelwert für SW-Ägypten, Stand 1980; nach Defence Mapping Agency, 1980

³⁾: Mittelwert für Bayuda Wüste, Stand 1980; nach Defence Mapping Agency, 1980

⁴⁾: Werte nach Sudan Survey Dep., 1975

4.0 Grundlagen der Messungen

4.1 Grundlagen der Paläomagnetik

Die Grundlagen der Paläomagnetik sind in der Literatur ausführlich dargestellt: Die allgemeine Methodik und mathematischen Grundlagen betreffend sei auf COLLINSON (1983) oder TARLING (1983) verwiesen. Auf gesteinsmagnetische Aspekte wird besonders - um nur eine Auswahl zu nennen - bei NAGATA (1961), ANGHEHEISTER und SOFFEL (1972), STACEY und BANERJEE (1974) und PETERSEN (1982) eingegangen. Ergebnisse und Anwendungsgebiete der Paläomagnetik werden in McELHINNY (1973), SOFFEL (1984) und TARLING (1983) dargestellt.

Es folgt ein Abriß der zum weiteren Verständnis notwendigen Tatsachen und Methoden.

Die Magnetisierung der Gesteine beruht auf einem meist geringen Gehalt magnetischer, genauer ferrimagnetischer Minerale. Dabei handelt es sich meist um Eisenspinelle aus der Mischreihe der Titanomagnetite und Titanomagnetite mit den jeweiligen Endgliedern Magnetit und Maghemit, um Eisenoxide aus der Mischreihe Hämatit und Ilmenit sowie um das Eisenhydroxid Goethit. Diese Minerale sind im Gestein verteilt. Durch ihren Gehalt an ferrimagnetischen Partikeln besitzen die Gesteine auch alle die Eigenschaften der Ferrimagnetika, wie Koerzitivkraft, Blockungstemperatur und Remanenz.

Die Magnetisierung einer Probe besteht aus 2 Anteilen:

- der induzierten Magnetisierung, die nur solange besteht wie ein äußeres Magnetfeld auf die Probe einwirkt und
- der remanenten Magnetisierung, die auch bei Verschwinden eines äußeren Feldes erhalten bleibt. Ihre Richtung stimmt im allgemeinen mit der Richtung des äußeren Feldes überein. Nur die remanente Magnetisierung, kurz Remanenz genannt, ist für die Paläomagnetik von Bedeutung.

Gesteine können auf verschiedene Art und Weise eine Remanenz erwerben. Für die weitere Diskussion sind folgende Remanenzarten

von Bedeutung:

- TRM (thermoremanente Magnetisierung): Sie entsteht bei Abkühlen des Gesteins von Temperaturen oberhalb zu Temperaturen unterhalb der Curietemperatur(en) der magnetischen Phase(n). Die TRM wird bei der Entstehung des Gesteins oder bei Wiedererhitzung (Metamorphose) gebildet. Im ersten Fall ist die TRM eine primäre Remanenz.

- CRM (chemische remanente Magnetisierung): Sie entsteht bei der Neubildung und dem Heranwachsen eines magnetischen Minerals in einem äußeren Feld bei niedrigen Temperaturen. Die CRM weist immer in Richtung des äußeren Feldes.

- IRM (isothermale remanente Magnetisierung): Eine IRM wird von einer Gesteinsprobe in einem äußeren Feld bei konstanter Umgebungstemperatur erworben. Alle Gesteine der Erde waren mehr oder weniger lange Zeit dem terrestrischen Feld ausgesetzt, sind somit auch Träger einer IRM.

- VRM (viskose remanente Magnetisierung): Als viskos werden zeitlich instabile Remanenzen bezeichnet, ihre Intensität ändert sich innerhalb im Labor meßbarer Zeiten.

Diese Komponenten bilden allein oder in Kombination die natürliche remanente Magnetisierung (NRM) der Gesteine. Die verschiedenen Remanenztypen unterscheiden sich zum Teil in ihrer Resistenz gegen Entmagnetisierung, d.h. in ihrem Koerzitivkraft- und Blockungstemperaturspektrum. Dies wird bei den Verfahren der schrittweisen Entmagnetisierung mit Wechselfeldern oder auf thermischen Wege durch Erhitzen ausgenutzt, um eine gesuchte stabile Komponente der Magnetisierung herauszupräparieren.

Für die Paläomagnetik ist meist die Komponente der NRM entscheidend, die gleichzeitig mit oder unmittelbar nach der Entstehung des Gesteins gebildet wurde. Sie wird als CARM, charakteristische remanente Magnetisierung, bezeichnet. Bei magmatischen Gesteinen wird es sich in der Regel um eine TRM handeln.

4.2 Remanenzmessung und ihre Verlässlichkeit

4.2.1 Gerätebeschreibung

Die Remanenzmessungen wurden in der Außenstelle des Instituts für Allgemeine und Angewandte Geophysik in Niederlippach bei Landshut, Labor für Gesteins- und Paläomagnetismus, durchgeführt. Durch die günstige Lage fernab von Wohn- und Industriegebieten ist der Einfluß technischer Störfelder gering.

Die Vermessung von Intensität und Richtung der remanenten Magnetisierung wurde an einem Digico Spinnermagnetometer mit μ -Metallabschirmung durchgeführt. Daran angeschlossen ist ein Minirechner pdp 11/03. Die Probe rotiert mit ca. 7 Hz innerhalb von ringförmig angebrachten Förstersonden in Vierpunktanordnung. Die remanente Magnetisierung der Probe in der Ebene senkrecht zur Drehachse verursacht periodische, sinusförmige Änderungen des magnetischen Flusses in den Meßsonden. Dieses Signal wird über einen Analog-Digital Wandler vom Rechner pro Umdrehung an 128 Punkten abgetastet, je nach Signalstärke wird über eine frei wählbare Anzahl von Umdrehungen gestapelt (siehe auch Abschnitt 4.2.2.1). Danach wird durch Fourieranalyse der Koeffizient der Grundschiwingung, d.h. der Schwingung, die der Rotationsfrequenz der Probe entspricht, bestimmt. Aus diesem Fourierkoeffizienten als komplexer Größe können 2 orthogonale Komponenten bzw. Intensität und Phase des Signals berechnet werden. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich bei MOLYNEUX (1971).

Die Messungen erfolgten in der sogenannten 6-Spin Technik (siehe Tabelle VI). Eine PROBENMESSUNG besteht aus 6 verschiedenen EINZELMESSUNGEN. Eine Einzelmessung liefert 2 orthogonale Magnetisierungskomponenten aus der Ebene senkrecht zur Spinachse der Probe. Durch die Messung in 6 verschiedenen Positionen werden die Magnetisierungskomponenten in den 3 Hauptrichtungen 4-fach überbestimmt.

Durch die Mehrfachmessung - in verschiedenen Orientierungen der Probe bezüglich der Förstersonden - sollen sich Meßfehler, verursacht durch magnetische Instabilität der Probe, Probeninhomogenität, höhere Terme als Dipolmomente der Magnetisierung oder durch Asymmetrien des Instruments, gleichmäßig auf die

Remanenzkomponenten verteilen und sich bei der Mittelwertbildung zur Errechnung von Intensität und Richtung der Remanenz gegenseitig aufheben.

Die Probe kann für sich allein oder mittels eines würfelförmigen Probenhalters in die 6 verschiedenen Meßpositionen gebracht werden. Im letzteren Fall kann eine eventuell vorhandene Magnetisierung des Probenhalters als Störeffekt mit in die Messung eingehen.

Tabelle VI: Reihenfolge der Messungen der Magnetisierungskomponenten x, y, z in 6 verschiedenen Probenpositionen. Das Meßsignal wird in die 2 orthogonalen Meßkomponenten A und B zerlegt.

Positionsnummer	A	B
1	-y	z
2	-x	z
3	y	-z
4	x	-z
5	y	x
6	-y	x

4.2.2 Meßgüte und Empfindlichkeit

Die Meßgüte und Meßempfindlichkeit kann auf 3 verschiedenen Niveaus betrachtet werden, auf dem der Einzel-, der Proben- und der wiederholten Probenmessung:

4.2.2.1 Einzelmessung

Die Meßgüte der Einzelmessung wird zum einen charakterisiert durch die Kenngröße "Distortion". Sie beschreibt die Abweichung zwischen wirklich gemessenem und gestapeltem Signal auf der einen und einem durch Fourieranalyse aus den Messwerten gewonnenen idealen Signal auf der anderen Seite. Für jeden der 128 Meßpunkte wird die Abweichung bestimmt. Die Summe dieser quadrierten Ab-

weichungen für alle 128 Punkte wird auf die Signalstärke normiert und die Quadratwurzel daraus dann bildet die "Distortion". Deren Betrag ist klein, wenn das über mehrere Umdrehungen gestapelte Meßsignal symmetrisch um die Nulllinie verteilt und sinusähnlich ist.

$$d_i = \sqrt{f \cdot \left(\sum_n m_n - s_n \right)^2} \quad \text{mit } n = 1 \text{ bis } 128$$

$$s_n = K \cdot \sin(2\pi \cdot (n-1)/128) + L \cdot \cos(2\pi \cdot (n-1)/128)$$

$$D = \left(\sum_i d_i \right) / 6 \quad \text{mit } i = 1 \text{ bis } 6$$

dabei sind:	D	"Distortion" der Probenmessung
	d_i	"Distortion" der i-ten Einzelmessung
	m_n	gemessenes und gestapeltes Signal des n-ten Meßpunktes
	s_n	synthetische Signalgröße für den n-ten Meßpunkt
	K, L	Fourierkoeffizienten
	f	Normierungsfaktor

Das Verhältnis von Nutz- zu Störsignal läßt sich durch Stapelung der Meßwerte von mehreren Umdrehungen erhöhen. Eine ausführliche Diskussion findet sich bei MOLYNEUX (1971). Eine Vergrößerung der Drehzahl um den Faktor N wird danach bei Vorliegen von nur statistischen Störungen das Nutz- zu Störsignalverhältnis um den Faktor $\sqrt{N}$ verbessern. MOLYNEUX gibt bei 2° (256) Umdrehungen noch einen Störpegel von $0.061 \cdot 10^{-3}$ A/m an. Bei Annahme von einem Nutz- zu Störsignalverhältnis von 5 erhält man als kleinste zuverlässig meßbare Komponente $0.305 \cdot 10^{-3}$ A/m. Bei zusätzlicher Annahme von 3 gleich großen Komponenten der Remanenz ergibt sich für die kleinste, noch sicher meßbare Intensität der Magnetisierung $0.53 \cdot 10^{-3}$ A/m.

Wie sich im Lauf der Diskussion zeigen wird, muß dieser Wert nach oben korrigiert werden, da die Annahmen einer rein statistischen Verteilung der Störsignale und gleicher Beträge der Komponenten in der Praxis nicht erfüllt sind.

4.2.2.2 Probenmessung

4.2.2.2.1 Kontrollparameter S_m/M

Das eigentliche Interesse des Paläomagnetikers liegt nicht so sehr an der guten Qualität der Einzelmessung als vielmehr an der Güte der Probenmessung, der Verlässlichkeit der aus 6 Einzelmessungen bestimmten Richtung und Intensität der Remanenz. Die Zuverlässigkeit der Meßwerte wird über ihre Reproduzierbarkeit beurteilt.

Verschiedene Güteparameter werden von CHANNELL (1977), LOWRIE und ALVAREZ (1977), HARRISON (1980), LOWRIE et al. (1980) und BRIDEN und ARTHUR (1981) vorgeschlagen und diskutiert. Diese Parameter basieren auf der Standardabweichung der gemessenen Intensität sowie der internen Dispersion der aus einer Probenmessung generierbaren Richtungsvektoren.

Für die Probenmessung am Spinnermagnetometer wurde der Parameter S_m/M , die fraktionierte Standardabweichung der Intensität, gewählt. Diese Größe ist nach LOWRIE (1980) und HARRISON (1980) folgendermaßen definiert:

$$S_m^2 = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2) / 3$$

$$M^2 = M_x^2 + M_y^2 + M_z^2$$

mit S_i^2 : Varianz der Remanenzkomponente M_i

$$= 1/3 * ((i - M_i)_1^2 + (i - M_i)_2^2 + (i - M_i)_3^2 + (i - M_i)_4^2)$$

M_i : arithmetischer Mittelwert der i-ten Remanenz-Komponente; $i=x,y,z$

i_k : k-ter Meßwert der i-ten Komponente; $k=1,4$

Die Auswahl dieser Größe bringt folgende Vorteile mit sich: Die Berechnung kann gleichzeitig mit Bestimmung der Deklination und Inklination schnell und einfach durchgeführt werden. Dieser Parameter ist ein gutes Maß nicht nur für Abweichungen in den

ABB. 12

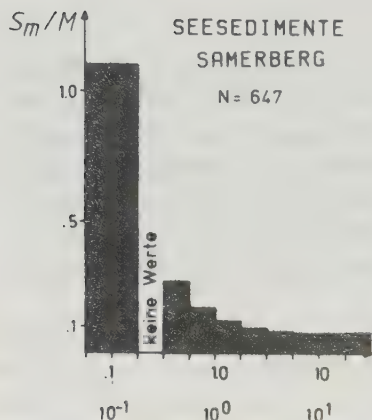


ABB. 13

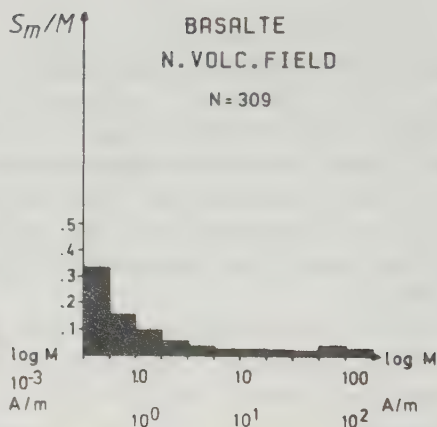
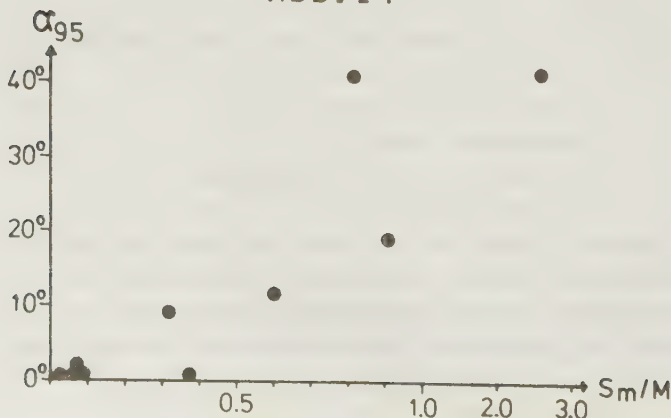


Abb.12 und Abb.13: Abhängigkeit des Parameters S_m/M von der Magnetisierungsintensität M (in halblogarithmische Darstellung). Bei den Seesedimenten des Interglazialsees Samerberg (Abb.12) wurde die NRM vermessen, während bei den Basalten des Northern Volcanic Fields (Abb.13) Meßwerte der NRM und der im Wechselfeld behandelten Remanenz herangezogen wurden. Deutlich wird das unterschiedliche Ansteigen von S_m/M bei abnehmender Magnetisierungsintensität M . Beachte den Unterschied um den Faktor 1000 für die Einheit der Magnetisierung M .

Abb.14: Zusammenhang zwischen dem Konfidenzwinkel α_{95} der Fisher-Statistik und dem gemittelten Parameter S_m/M aus fünffach wiederholten Probenmessungen. Dargestellt sind 10 Beispiele.

ABB. 14



Intensitätsbestimmungen, sondern auch für die Größe der internen Winkeldispersion, die für den Paläomagnetiker von besonderer Bedeutung ist. Wie LOWRIE et al. (1980) zeigen, korreliert S_m/M mit der Standardwinkeldispersion linear für S_m/M Werte kleiner 1.0. Die Winkeldispersion und der Güteparameter S_m/M erscheinen als gleichwertige Indikatoren für Streuung in den Meßdaten.

4.2.2.2.2 Testmessungen und Empfindlichkeit

Zur empirischen Bestimmung der Meßgeräteempfindlichkeit wurde an mehreren Meßreihen die Abhängigkeit des Parameters S_m/M von der Intensität der Magnetisierung M eingehend untersucht. Zwei gegensätzliche Fälle werden exemplarisch herausgegriffen:

Zum einen handelt es sich um die Messungen der natürlichen Remanenz von Seesedimenten des Interglazialsees am Samerberg (Meßwerte wurden freundlicherweise von Herrn Ch. ROLF zur Verfügung gestellt) sowie um Messungen der natürlichen wie auch im Wechselfeld behandelten Remanenz von Basalten des Northern Volcanic Fields. Dazu siehe Abbildung 12 und 13.

Bei den Seesedimenten können alle Proben mit Magnetisierungen über $1 \cdot 10^{-3}$ A/m verläßlich gemessen werden, die Größe S_m/M schwankt um 0.05 bis 0.10. Im Intensitätsbereich 1.0 bis $0.3 \cdot 10^{-3}$ A/m macht sich die Rauschgrenze des Geräts bemerkbar; die Messungen sind zunehmend fehlerbehaftet, die S_m/M Werte liegen zwischen 0.1 und 0.3. Messungen von Intensitäten kleiner als $0.3 \cdot 10^{-3}$ A/m schließlich erweisen sich als unbrauchbar, das Nutzsignal geht im Rauschen unter.

Ganz anders ist das Verhalten der Basalte des Northern Volcanic Fields. Hier sind die Messungen bereits bei Intensitäten unter $560 \cdot 10^{-3}$ A/m mit Unsicherheiten behaftet. Als begrenzendes Moment tritt hier nicht die Rauschgrenze des Geräts auf, sondern die magnetische Instabilität der Proben. Sie hat zur Folge, daß die Proben beim Herausnehmen aus dem μ -Metallschild und Drehen in die neue Meßposition kurzfristig eine viskose Remanenz (VRM) erwerben. Diese Instabilität taucht verstärkt bei den im Wechselfeld behandelten Proben auf.

Anhand dieser 2 Beispiele wird deutlich, daß stabile Magneti-

sierungen bis hinab zur Meßgrenze zwischen 0.3 und $0.5 \cdot 10^{-3}$ A/m gemessen werden können (siehe Abb. 12). Magnetische Instabilität verhindert jedoch in vielen Fällen ein Vordringen bis zur Meßgrenze des Instruments.

4.2.2.2.3 Magnetisierung der Plattform

Ein störender Einfluß bei den Messungen kann aus der eventuell auftretenden Magnetisierung der Probenplattform resultieren, die z.B. durch Staub und Schmutz verursacht wird. Zu ihrem Auffinden werden über alle 6 Einzelmessungen die in Tabelle VI dargestellten Komponenten A und B separat aufaddiert (bei Komponente B wird die letzte Messung mit negativen Vorzeichen versehen). Die von der Gesteinsprobe stammenden Signale werden sich im Idealfall zu Null kompensieren, übrig bleibt nur die von der Plattform verursachte Restmagnetisierung. Diese sollte nicht mehr als ca. 10 Prozent der Gesamtmagnetisierungs-Intensität betragen.

4.2.2.3 Mehrfache Probenmessung

Über die Reproduzierbarkeit von Probenmessungen ergibt sich eine 3.Möglichkeit, zu einer Aussage über die Güte der Messung zu kommen. Dieses Vorgehen wird im Routinebetrieb aus zeitlichen Gründen nicht gewählt.

Nach Anwendung der Fisherstatistik (FISHER, 1953) auf jede der aus den Probenmessungen ermittelten Richtungen bietet sich als Kenngröße der Konfidenzwinkel α_{95} an.

An Stichproben wurde empirisch der Zusammenhang zwischen α_{95} und S_m/M ermittelt. Dazu siehe Abbildung 14. An 10, zum Teil sehr schwach magnetischen Proben wurden Probenmessungen jeweils 5-mal wiederholt. Aus diesen Meßreihen wurde für jede Probe ein mittleres S_m/M sowie aus den Richtungen mittels Fisherstatistik ein zugehöriges α_{95} bestimmt.

Es wird deutlich, daß für kleine S_m/M Werte (kleiner 0.4) die Reproduzierbarkeit gut ist; die dazugehörigen Konfidenzwinkel α_{95} liegen unter 10° .

4.2.2.4. Gütekriterium

Da eine Probenmessung 6 Einzelmessungen umfaßt, erhält man 6 im strengen Sinne unabhängige Meßwertepaare. Damit lassen sich 2 unabhängige Bestimmungen des Magnetisierungsvektors durchführen. Diese geringe Grundmenge läßt keine Ableitung eines Gütekriteriums nach dem Zufallstest von WATSON (1956) zu.

Als Ergebnis der Testmessungen und aus Erfahrung hat sich gezeigt, daß Probenmessungen mit $S_m/M \leq 0.3$ vertrauenswürdig sind. Bei S_m/M Werten über 0.3 ist eine Wiederholung der Probenmessung mit erhöhter Stapelzeit zu empfehlen.

Probenmessungen, deren Kontrollparameter S_m/M den Wert 0.4 übersteigt, wurden von einer weiteren Auswertung, z.B. Bestimmung der charakteristischen Remanenz, ausgeschlossen.

4.2.3 Zusammenfassung

Bei der Remanenzmessung am Spinnermagnetometer werden Plattformmagnetisierung, "Distortion" und S_m/M als Fehlerkenngrößen bestimmt. Die empfindlichste und vielseitigste Größe ist S_m/M : Sie ist abhängig von folgenden Faktoren:

- fehlerhafte Kalibrierung des Geräts durch ungenaues Positionieren des Meßstandards oder ungenaues Ausrichten der Probenplattform bezüglich der Sonden
- fehlerhaftes und/oder ungenaues Positionieren der Gesteinsprobe auf der Meßplattform
- Restmagnetisierung der Probenplattform
- Inhomogenität der Magnetisierung in der Gesteinsprobe
- Beeinflussung der Natürlichen Remanenz durch äußere Störfelder und damit Bildung einer VRM
- zu kleine Magnetisierungsintensität der Gesteinsprobe

Es wurde gezeigt, daß der Parameter S_m/M als Maß für die Intensitäts- und indirekt auch für die Winkelstreuung zuverlässig erlaubt, die Brauchbarkeit einer Probenmessung zu beurteilen.

5.0 Messungen und Ergebnisse

Im weiteren wird jede Lokalität als eigenständige Einheit behandelt. Daten zur Geologie, Messungen, an Beispielen dargestellt, und Ergebnisse sind in einem Abschnitt zusammengefaßt. Abbildungen und Tabellen werden für jede Lokalität mit einem eigenem Kennkürzel versehen und durchnummeriert.

Eine Gesamtinterpretation aller Ergebnisse wird in Kapitel 6 versucht. Vorab soll kurz auf die Methodik der paläomagnetischen und gesteinsmagnetischen Messungen eingegangen werden und die dabei eingesetzte Datenverarbeitung erläutert werden.

5.1 Methodik

5.1.1 Gesteinsmagnetik

Die gesteinsmagnetischen Untersuchungen wurden überwiegend im Labor in München durchgeführt. Sie dienen dazu, Aussagen zu treffen über:

- den oder die Träger der Remanenz,
- die Stabilität der Remanenz über Meß- und geologische Zeiträume und
- die Art und Entstehungsgeschichte der Remanenz.

Hier sind Erzmikroskopie, IRM-Erwerb (IRM(B)-Kurve), Gitterkonstantenbestimmung und thermomagnetische Messungen ($M_s(T)$ -Kurven) an ausgesuchten Proben zu nennen.

5.1.2 Paläomagnetik

Die natürliche Remanenz (NRM) aller Proben wurde -soweit möglich- vermessen. War die NRM eines Vorkommens unter oder nahe an der Meßgrenze des Geräts und war erkennbar, daß nicht 2 antiparallele und sich gegenseitig kompensierende Magnetisierungsrichtungen vorliegen, so mußte auf eine Bearbeitung verzichtet werden.

Von allen anderen Vorkommen wurden Pilotproben einer schrittweisen Entmagnetisierung unterzogen. Dabei wurde Wert darauf

gelegt, Zwillingsproben aus ein und demselben Kern jeweils thermisch und im Wechselfeld zu untersuchen. Im Regelfall wurden diesem Verfahren 2 bis 3 Zwillingsproben von jedem Vorkommen unterzogen.

Um eventuelle Mineralumwandlungen bei der thermischen Behandlung kritischer Gesteine sofort zu bemerken, wurde an diesen nach jedem Entmagnetisierungsschritt und unmittelbar anschließen der Remanenzmessung die Suszeptibilität der Probe bestimmt. Eine Mineralumwandlung zeigt sich durch eine deutliche Änderung der Suszeptibilität.

Um das Entstehen viskoser Remanenzen möglichst zu unterbinden, wurden die Proben in der Zeit zwischen Abmagnetisierung und Messung in μ -Metall Behältern von äußeren Feldern abgeschirmt.

Die Messungen wurden anhand von Zijdeveld-Diagrammen (ZIJDERVELD, 1967) und Darstellung der Richtungsvektoren und Differenzvektoren im Schmidt'schen Netz ausgewertet. Zijdeveld-Diagramme sind Projektionen, die das Verhalten der Richtung und der Intensität bei der schrittweisen Entmagnetisierung einer Probe darstellen. Es werden ausschließlich echte Zijdeveld-Diagramme benutzt: Der Magnetisierungsvektor wird zum einen in die xy-Ebene und zum anderen in die xz- oder yz-Ebene, je nachdem wie die Darstellung deutlicher ist, projiziert. Werden die Magnetisierungsvektoren im probeninternen System betrachtet, so ist dies durch die Abkürzung NC ("no correction") nach dem Probenamen gekennzeichnet. Die Achsen des Zijdeveld-Diagramms sind dann mit x, y und z beschriftet. Meist jedoch werden die kernkorrigierten Vektoren im geographischen System dargestellt. Dies wird durch die Abkürzung CC ("core corrected") nach dem Probenamen angedeutet, die Achsen des Diagramms stellen dann die 4 Himmelsrichtungen (N, E, S und W) und die Vertikale (z) dar. Die beiden Projektionen des Vektors werden mit den Kürzeln XY und XZ bzw. YZ gekennzeichnet. Der Achsenmaßstab ist angegeben.

Jedes Zijdeveld-Diagramm wird durch eine Abmagnetisierungskurve ergänzt. Aufgetragen ist dort die auf die Anfangsintensität normierte Magnetisierung gegen den Entmagnetisierungsschritt, also die Temperatur (in Grad Celsius) bei thermischer Behandlung oder die Spitzenfeldstärke (in mT) der Wechselfeldbehandlung. Die

Größe der Anfangsintensität ist unterhalb des Probennamens angegeben. Wurden Suszeptibilitätswerte bei den Entmagnetisierungsschritten gemessen, so sind diese ebenfalls normiert auf den Anfangswert eingetragen und der Anfangswert (in SI-Einheiten) wird angegeben.

War eine Entmagnetisierung unter Erreichung einer stabilen Endrichtung mit einem dieser Verfahren möglich, so wurde eine optimale Temperatur bzw. Spitzenfeldstärke des Wechselfelds bestimmt und alle restlichen Proben des Vorkommens damit behandelt. In einigen Fällen wurde für jede Probe separat eine Entmagnetisierung in mehreren Schritten durchgeführt.

Zur Entmagnetisierung kam eine thermische Anlage (TSD-1) der Firma Schonstedt sowie die Wechselfeldapparatur der Firma Highmoore und ein Institutseigenbau mit jeweiligen Spitzenfeldstärken von 100 mT bzw. 120 mT zum Einsatz. Bei letzteren handelt es sich um Taumlerapparaturen, bei denen die Probe simultan um 2 orthogonale Achsen rotiert; die Probe wird in einem Arbeitsgang in allen Richtungen gleichzeitig entmagnetisiert. Wahlweise kann der Eigenbau des Instituts auch nach dem Prinzip der Mehrachs-Entmagnetisierung eingesetzt werden, d.h. es wird entlang mehrerer Achsen (mindestens 3 orthogonale) mit stationärer Probe entmagnetisiert. Es können bis zu 10 Proben gleichzeitig behandelt werden. Doch besteht hier die Gefahr unerwünschter Wechselwirkungen der Proben untereinander. Eine detailliertere Beschreibung der Geräte geben KIM (1981) und SARADETH (1983).

5.1.3 Datenverarbeitung

Um die Bearbeitung der großen Probenzahl durchführen zu können, wurde das bestehende Meßsystem weiter verbessert (Berechnung des Fehlerparameters, beschleunigtes Messen und erhöhter Bedienkomfort) und um Programme zur Auswertung und graphischen Darstellung erweitert.

Im folgenden wird eine kurze Auflistung der Geräte und Programme gegeben. Eine vollständige Beschreibung ist in einer eigenen Dokumentation vorgesehen.

Die eingesetzten Geräte sind:

- ein pdp 11/03 Minicomputer unter dem Betriebssystem RT11 zur Meßwerterfassung und Auswertung,
- ein IBM kompatibler Personalcomputer (Olivetti M24) mit dem Betriebssystem MS-DOS und daran angeschlossenen
- Watanabe MP 1000 Plotter zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse,
- der CDC 175 Großrechner des Leibniz Rechenzentrums München und
- dazugehörige Datenterminals, wie Drucker und Monitore.

Ein Überblick der verfügbaren Programme und eine kurze Funktionsbeschreibung vermittelt Tabelle VII.

Entscheidend bei der Auswertung ist, daß alle Daten bei ihrer Erfassung auch auf Diskette gespeichert werden können. Alle weiteren Auswerteschritte greifen auf die gespeicherten Daten zurück, so daß keine Notwendigkeit mehr für eine langwierige und fehlerbehaftete Dateneingabe von Hand besteht.

Bezüglich der mathematischen Formeln für Kernkorrektur, Schichtlagekorrektur, Fisherstatistik und Paläopolbestimmung sei auf TARLING (1983) und COLLINSON (1983) verwiesen.

Tabelle VII: Überblick der Paläomagnetikprogramme

Funktion	Name	Rechner pdp PC CDC	Kurzbeschreibung
Meßwerterfassung	SPINK ¹⁾	x	Meßprogramm, 4/6 Positionen, Datenspeicherung
	SIXSPI	x	Messung, 6 Positionen, S_m/M Kern- u. Beddingkorrektur, Datenspeicherung
	TEST ¹⁾	x	Selbsttest des Meßgeräts
	SPINNER ²⁾	x	Meßprogramm entsprechend SIXSPI
Auswertung	ALPHA	x	Fisherstatistik, Paläopole, Schmidt'sches Netz
	DIFVEK	x	Differenzvektoren auf File
	DATKOR	x	Kernkorrektur auf File
	BEDKOR	x	Beddingkorrektur auf File
	KEBEKOR ⁵⁾	x	Kern- und Beddingkorrektur
	SUSZ ³⁾	x	Q-Faktorenberechnung
	EULER	x	Eulerrotation von Paläopol-lagen
	SUNCOR	x	Sonnenkompaß: aus Ephemeriden u. Feldmessung
Darstellung	SPISTA	x	Daten für Kernkorrektur Zusammenhang von M und S_m/M
	ZIJ ³⁾	x	echte/unechte Zijderveldplots, Richtungen u. Differenzvektoren im Schmidt'schen Netz, Entmagnetisierungskurve
	FISHER	x	Kappa(T)-Kurve Schmidt'sches Netz u. Fisher-statistik, α_{95} -Kreise
	IRM ³⁾	x	IRM-Erwerb, Koerzitivkraftspektrum
	HIST	x	Histogramme
	HYPM5 ⁴⁾	x	Erdprojektionen und Rotationen
	ALF95	x	Werte für α_{95} -Kreise für HYPM5
Dienstprogramme	EDDAT ¹⁾	x	Editierprogramm f. Datenfile
	QSORT	x	Sortierprogramm
	ASCII	x	Aufbreitung f. Übertragung von Datenfiles
	RSLINK ²⁾	x	Kommunikationsprogramm PC-pdp
	WRITEN	x	Manuelles Anlegen von Files f. Korrektur-, Ephemeriden- u. Sonnenkompaßdaten
	INPUT	x	Dateneingabe von Hand

- ¹⁾ Autor der Urversion: H. Miller, S. Erwin
²⁾ Autor: V. Liebig
³⁾ Koautor: J. Czarnowski
⁴⁾ Autor: R. L. Parker, umgeschrieben auf Fortran 5 von J. Czarnowski
⁵⁾ Autor: Ch. Rolf

5.2 Messungen und Ergebnisse

5.2.1 Northern Volcanic Field

Geologie

Die Bayuda Wüste wurde im Rahmen eines gemeinsamen Explorationsprojekts von BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover) und GMRD (Geological and Mineral Resources Department, Khartum) kartiert und geologisch untersucht (BARTH u. MEINHOLD, 1979; BARTH u. MEINHOLD, 1981). Es werden mehrere regionale Felder mit känozoischem Vulkanismus verzeichnet.

Für eine paläomagnetische Beprobung wurden die Basalte, Latite und Phonolite des Northern Volcanic Fields (siehe Abb.8 u. 9) ausgewählt. Sie werden bei BARTH u. MEINHOLD (op.cit.) und ALMOND et al. (1984) wie folgt beschrieben:

Die Vulkanite extrudierten durch eine Decke klastischer Sedimente. Über eine Fläche von ca. 200 km² sind über 100 Eruptionszentren verteilt. Vulkanische Plugs treten ebenfalls vereinzelt in der weiteren Umgebung des Feldes auf. Die meisten der häufig tief erodierten Plugs und Transportspalten liegen morphologisch als bis zu 180 m hohe, kegelförmige Inselberge vor. Dazwischen erstrecken sich Ebenen aus klastischen Sedimenten und Sandsteinen der Nubischen Serie.

Die Geländebeziehung - die Vulkanite sind jünger als die Nubische Serie im Liegenden - wird durch radiometrische Altersbestimmungen bestätigt. Versuchsweise ermittelte K/Ar-Gesamtgesteinsalter an 3 Phonolit-, 2 Basalt- und einer Latitprobe liegen zwischen 62 und 74 Ma und somit an der Kreide-Tertiär-Wende (BARTH u. MEINHOLD, 1979). Weitere, detaillierte K/Ar-Mineralalterbestimmungen an Proben der Paläomagnetik-Kollektion sind in Arbeit (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, pers.Mittl.).

Beprobte wurden an 6 Vorkommen Basalte und an 2 Vorkommen Phonolite. Die Phonolite wurden als Handstücke von den Gipfeln der Inselberge Gebel Umm Shereiba und Gebel Barget Amr genommen, die Basalte von Bergflanken und Wadi-Einschnitten als Kernproben. Die Beprobungspunkte sind in einer geologischen Übersichtskarte (Abb. NVF-1) eingetragen. Die Suche nach anstehendem Gestein gestaltete sich schwierig. Meist waren die Vulkanite nur als

Lesesteine aufgeschlossen oder von Hangschutt bedeckt.

Messungen

Die Vulkanite zeichnen sich durch eine relativ starke Intensität der NRM mit Werten zwischen 1 und 316 A/m aus (Abb. NVF-2). Die Phonolitproben sind durch im Vergleich zu den Basalten geringere NRM-Intensitäten charakterisiert.

Die Königsberger Q-Faktoren, als Verhältnis der NRM zur im heutigen Erdfeld induzierten Magnetisierung, sind für alle Proben größer 1 und erreichen Werte bis über 100. Das Häufigkeits-Maximum liegt im Bereich zwischen 10 und 30 (Abb. NVF-3). Dies sind Werte wie sie bei Basalten für eine TRM erwartet werden.

Die Richtungen der NRM weisen starke Streuungen sowohl innerhalb der Vorkommen wie auch zwischen den Vorkommenmittelwerten auf. Dazu siehe Abb. NVF-7 und Tabelle NVF I.

Entmagnetisierungsexperimente (Abb. NVF-9 bis 10) zeigen, daß die Wechselfeldbehandlung mit Feldern von 15-20 mT zu einer bis zu 50 mT stabilen Endrichtung führt. Das Feld, das die Hälfte der Magnetisierungsintensität auslöscht (MDF=medium destructive field), ist kleiner als 5 mT. Dies deutet auf eine relativ große, viskose Komponente der Magnetisierung (VRM) hin. Sie wird durch Wechselfeldbehandlung beseitigt. Thermische Entmagnetisierung

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb. NVF 1: Geologische Übersichtskarte des Northern Volcanic Fields. Die 8 beprobten Vorkommen sind eingezeichnet.

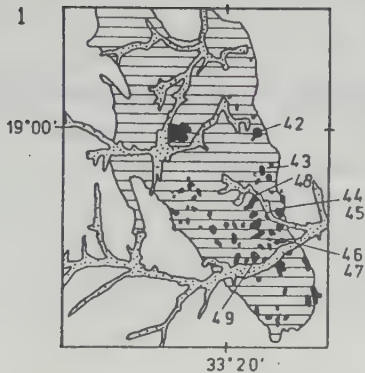
Abb. NVF 2: Häufigkeitsverteilung der Intensität der NRM (halb-logarithmische Darstellung). Eine Gesamtzahl von 193 Proben wurde bearbeitet.

Abb. NVF 3: Häufigkeitsverteilung der Q-Faktoren (halb-logarithmische Darstellung)

Abb. NVF 4: Beispiel für IRM-Erwerb und Koerzitivkraftspektrum anhand der Probe 47-9. Sättigung wird bereits bei 0.15 Tesla erreicht.

Abb. NVF 5 u. NVF 6: Thermomagnetische Messungen an den Kernen 47-9 und 49-5. Es werden Curietemperaturen von ca. 150°C bzw. 350°C (und untergeordnet bei ca. 550°C) bestimmt. Siehe auch Abb. 15 und Tabelle VIII.

NVF 1



VULKANITE

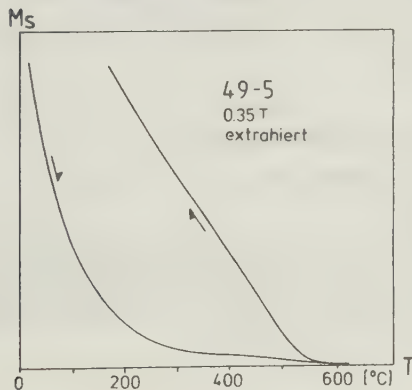
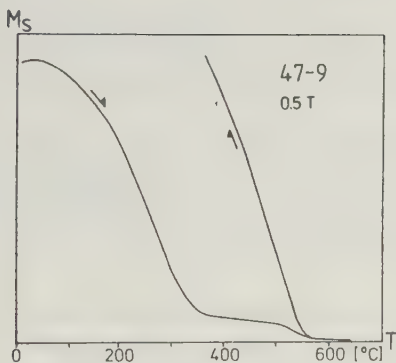
NUBISCHE SERIE

WADI-SEDIMENTE

BASEMENT

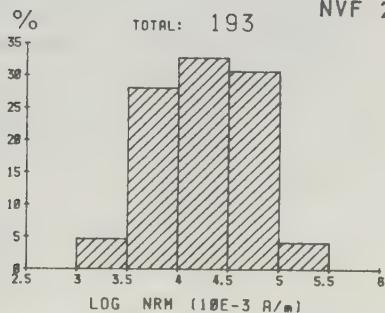
0 5 10
km

NVF 5

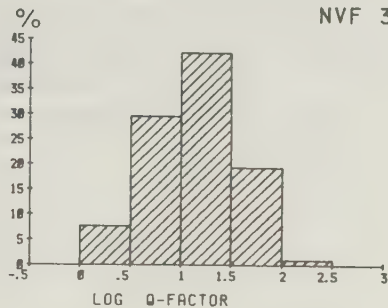


NVF 6

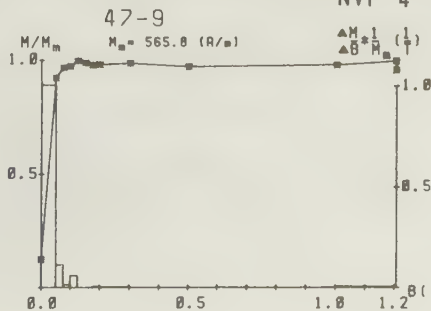
NVF 2



NVF 3



NVF 4



führt zu keiner stabilen Endrichtung. Der Hauptteil der Remanenz wird bei Temperaturen zwischen 200° und 400°C abgebaut.

Die Ergebnisse der Wechselfeldbehandlung sind in Tabelle NVF I zusammengefaßt. Die CARM-Richtungen und das Mittel der Vorkommenmittelwerte (mit Vertrauenskreis) sind im Schmidt'schen Netz (Abb. NVF-8) eingetragen. Durch die Entmagnetisierung wurde die Streuung sowohl innerhalb der Vorkommen als auch zwischen den Vorkommen erheblich vermindert. Alle Vorkommen haben eine normale Magnetisierung.

Die Phonolite der Vorkommen 42 und 43 liefern kein konsistentes Ergebnis. Sie wurden an exponierter Stelle beprobt, eine Blitzschlag-IRM muß angenommen werden.

Die 6 Vorkommenmittel liefern bei gleicher Gewichtung eine mittlere Richtung der CARM mit einer Deklination von 326.6° und einer Inklinasion von 4.9° mit $\alpha_{95}=12.8^\circ$. Dies entspricht einer Paläopolposition von 55.9°N, 277.8°E.

IRM(B)-Erwerbskurven deuten auf einen niederkoerzitativen Magnetisierungsträger. Sättigung wird bereits bei Feldern von 0.15 T erreicht (Abb. NVF-4).

$M_s(T)$ -Kurven liefern Curietemperaturen von 150° bis 350°C, wie sie für unentmischte Titanomagnetite typisch sind (Abb. NVF-5 u. 6). Durch das Aufheizen entmischt der Titanomagnetit in eine titanarme Phase nahe der Zusammensetzung von Magnetit und in eine titanreiche Phase.

Röntgenographische Gitterkonstantenbestimmungen wurden für die Proben 49-5 und 47-9 durchgeführt und die Werte für Curietemperatur und Gitterkonstante in das ternäre Diagramm mit entsprechenden Isolinien (nach READMAN u. O'REILLY, 1972) eingetragen (Abb. 15 und Tabelle VIII).

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Tab. NVF I: Paläomagnetik-Meßergebnisse der Vorkommen des Northern Volcanic Field.

Abb. NVF 7 und NVF 8: Projektion der Vorkommenmittel vor (NVF 7) und nach (NVF 8) Wechselfeldbehandlung im Schmidt'schen Netz. Das jeweilige Gesamtmittel ist angegeben und mit Quadrat und Kreuz gekennzeichnet. Das CARM-Gesamtmittel ist mit Konfidenzkreis angegeben.

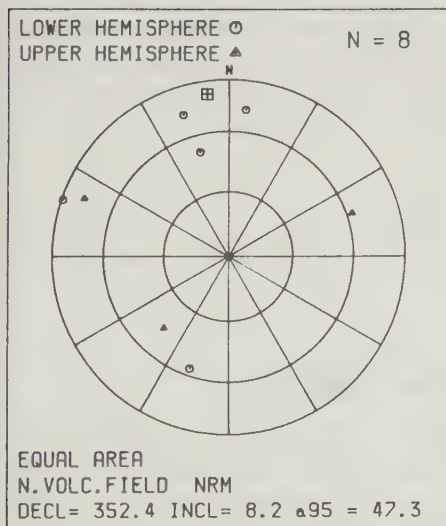
TABELLE NVF I

Paläomagnetik Ergebnisse von NORTHERN VOLCANIC FIELD (19.00°N, 33.30°E)
-Vorkommenmittel-

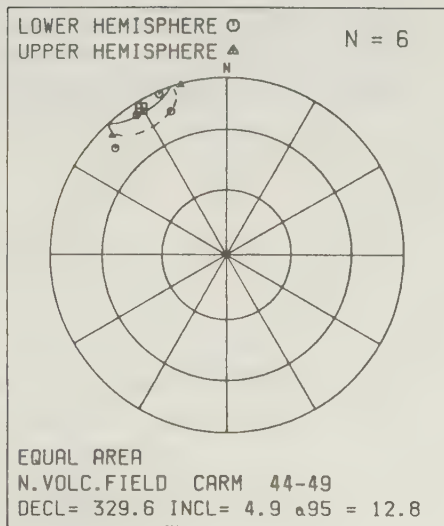
Vork Nr	NRM				AF(mT)	CARM				VGP		
	N	D	I	k		N	D	I	k	α_{95}	(°N)	(°E)
42	12	78.9	-26.9	2.1								
43	12	332.1	-33.2	1.7								
44	20	342.3	17.2	3.0	20	15	337.1	1.8	26.8	7.5	61.0	267.2
45	21	198.8	33.9	1.6	20	17	338.7	14.2	9.7	12.1	66.1	276.4
46	25	344.9	38.9	4.1	15	19	313.6	14.0	7.1	13.5	43.4	294.9
47	23	291.8	-13.3	3.4	15	17	315.9	-7.3	12.1	10.7	41.1	280.3
48	22	288.9	1.1	1.7	15	20	327.1	6.8	3.7	19.7	54.2	281.5
49	26	6.6	17.6	3.6	15	20	344.8	-0.9	3.8	19.3	65.4	252.4
Mittel der Vorkommenmittel:						6	329.6	4.9	28.2	12.8	55.9	277.8
K=36.0												
A95=11.3												

N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, K,k=Präzisionsparameter,
A95, α_{95} =Konfidenzwinkel; alle Winkelangaben in Grad

NVF 7



NVF 8



Die Ergebnisse der Messungen - niedrige Koerzitivkräfte wie sie in IRM(B)-Erwerb und bei Wechselfeldbehandlung nachgewiesen wurden und Blockungstemperaturen zwischen 200° und 400°C - deuten auf Titanomagnetite als einzig erkennbare Träger der Magnetisierung.

Die Erzmikroskopie zeigt zwei verschiedene Ausscheidungsstadien. Die früher ausgeschiedenen Körner konnten sich in Größen von 40 bis 250 µm und mehr ausbilden, die späteren erreichen nur noch eine Größe um 10 µm. An Erzen konnte primärer Ilmenit, meist homogener Titanomagnetit mit nur vereinzelten Ilmenitmischungslamellen und ferner in geringem Umfang Pyrrhotin, Kupferkies und Pentlandit (EL GORESY, pers.Mittl., 1986) identifiziert werden. Nach der von WILSON u. WATKINS (1967) aufgestellten 6-teiligen Skala der Hochtemperaturoxidation liegt Stufe 2 vor, die Titanomagnetite sind weitgehend unentmischt.

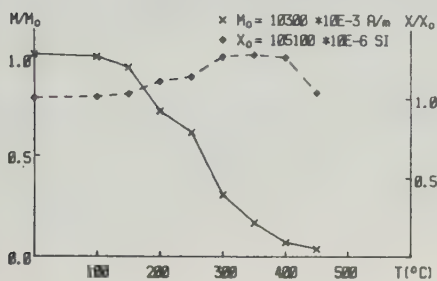
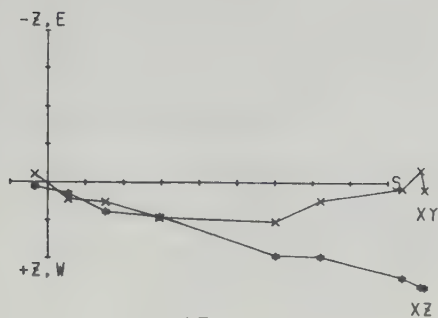
Die Basalte sind frisch und haben als magnetische Erzkomponente Titanomagnetite in ursprünglicher Zusammensetzung. Die CARM scheint eine primäre TRM zu sein, getragen von der kleinen Titanomagnetitkomponente aus Einbereichs- und Pseudoeinbereichsteilchen. Die größeren Titanomagnetit-Körner, hier handelt es sich um Mehrbereichsteilchen, tragen eine zeitlich instabile Magnetisierung. Auf ihr beruhen die beobachtete VRM und die geringe Stabilität im Wechselfeld.

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb. NVF 9 und 10: Entmagnetisierungsablauf dargestellt an Zijderveld-Diagrammen und Abmagnetisierungskurven. An den Kernen 45-4 (oben) und 48-7 (unten) wurden sowohl Wechselfeld- (rechts) wie thermische Behandlung (links) durchgeführt. Bei der thermischen Behandlung wurde der Verlauf der Suszeptibilität (Kappaplot) mitaufgenommen. Weitere Erläuterungen zu den Diagrammen auf Seite 32ff.

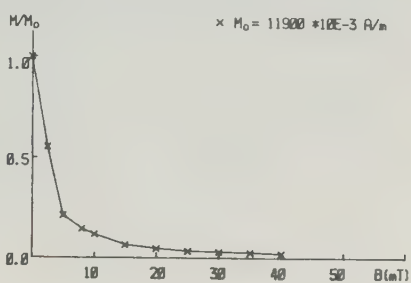
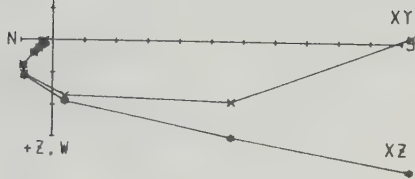
NVF 9

1 * 10E 0 A/m



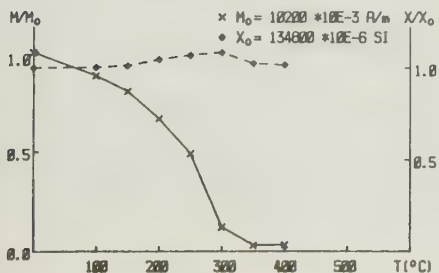
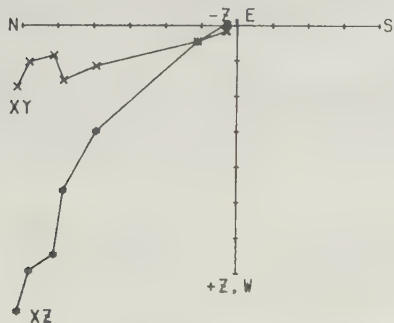
-Z, E

1 * 10E 0 A/m

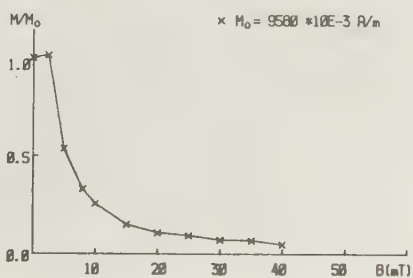
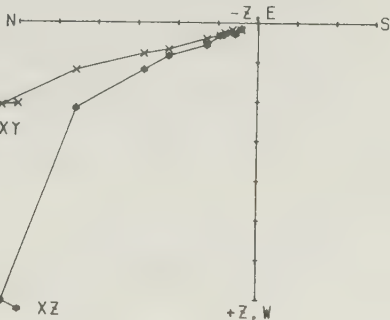


NVF 10

1 * 10E 0 A/m



1 * 10E 0 A/m



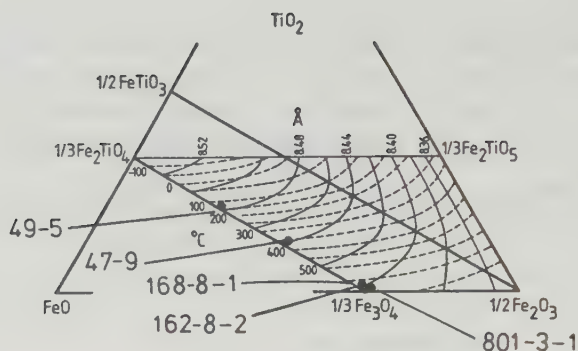


Abb.15: Linien gleicher Curie-Temperatur (gestrichelt) und Linien gleicher Gitterkonstante (durchgezogen) im Feld der Titanomagnetite (nach READMAN und O'REILLY, 1972). Eingezeichnet sind Meßpunkte aus Tabelle VIII. Alle Meßpunkte stellen Glieder aus der Mischreihe der Titanomagnetite dar.

Tabelle VIII: Gitterkonstanten und Curie-Temperaturen ausgewählter Proben

Lokalität	Probenname	Gitterkonstante (Å)	Curie-Temperatur (°C)
Northern	47-9	8.44	≈350
Volcanic Field	49-5	8.486	≈150
Bir Safsaf	801-3-1	8.396	≈560
Tehilla	162-8-2	8.394	≈560
Kadaweb	168-8-1	8.403	≈560

5.2.2 Nusab el Balgum

Geologie

Der Kenntnisstand über die Geologie des Komplexes ist noch niedrig. Eine Kartierung liegt nicht vor. Eine erste Beschreibung geben SCHANDELMEIER et al. (1983): Die Vulkanite des Nusab el Balgum Komplexes bestehen aus vulkanischen und subvulkanischen, porphyritischen Gesteinen, die in länglicher Form von NNE nach SSW streichend aufgeschlossen sind. Die Längserstreckung beträgt ca. 15 km. Die Zusammensetzung ist alkali-granitisch. Der Komplex wird von einer Vielzahl von Gängen meist rhyolitischer Zusammensetzung durchschnitten (siehe Abbildungen 8 u. 10 sowie BAL-1).

An 5 Proben der rhyolitischen Subvulkanite wurden von SCHANDELMEIER und DARBYSHIRE (1984) eine Rb/Sr-Gesamtgesteinsaltersbestimmung durchgeführt: Die 5 Punkte "Errorchrone" liefert ein Alter von 216 ± 5 Ma. Weitere K/Ar-Altersbestimmungen an Material der Paläomagnetik-Probensammlung sind in Vorbereitung (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, pers.Mittl.)

Die Paläomagnetik-Beprobung der Vulkanite und Gänge wurde an 10 Vorkommen durchgeführt, die über den ganzen Komplex verteilt sind. Von den Vorkommen 77, 78 und 79 wurden Handstücke genommen, sonst wurden Kerne gezogen. Das Material zeigt Anzeichen einer spätvulkanischen, metasomatischen Veränderung (HORN, pers.Mittl., 1985).

Messung

Die gemessenen NRM-Intensitäten liegen zwischen 3.0 und $3\,000 \cdot 10^{-3}$ A/m. Siehe dazu das Histogramm der NRM-Intensitäten in Abbildung BAL-2.

Die NRM-Richtungen der Vorkommenmittelwerte gruppieren mit einem Konfidenzwinkel α_{95} von 15.9° um die mittlere Richtung mit $\text{Dekl}=348^\circ$ und $\text{Inkl}=6.2^\circ$. Die Gruppierung innerhalb der Vorkommen ist weniger gut. Dazu siehe Tabelle BAL I und die Projektion der mittleren NRM-Richtungen im Schmidt'schen Netz (Abb. BAL-8).

Den Verlauf der Wechselfeld-Entmagnetisierungsversuche zeigen Abbildungen BAL-6 und 7. Eine hochkoerzitive Remanenz wird von Feldern bis über 70 mT fast nicht tangiert: Die Intensität der

NRM wird kaum verringert. Erst thermische Behandlung führt hier zum Abbau der Remanenz. Die gemessenen maximalen Blockungstemperaturen liegen bei über 650°C. Bis auf eine kleine viskose Remanenz liegt nur eine Magnetisierungskomponente vor. Dies deutet auf Hämatit als alleinigen Träger der Magnetisierung hin. In Kern 782-4 ist neben Hämatit - hochkoerzitiver Rest und Blockungstemperaturen über 600°C - eine weitere magnetische Phase enthalten. Sie ist ausgezeichnet durch eine niedrige Koerzitivkraft von 10 mT und trägt eine sekundäre, instabile Remanenz.

Alle Proben wurden thermisch behandelt. Dadurch wurde die Richtungsstreuung innerhalb und zwischen den Vorkommen stark verringert (Tab. BAL I und Abb. BAL-9). Mit einem Konfidenzwinkel von $\alpha_{95}=5.4^\circ$ wurde als mittlere Richtung $\text{Dekl}=350.8^\circ$ und $\text{Inkl}=-2.1^\circ$ aus 10 Vorkommen - alle mit normaler Magnetisierungsrichtung - bestimmt. Die dazugehörige Paläopollage ist 64.1°N und 230.7°E .

Hämatit als dominantes magnetisches Mineral wird bestätigt durch:

- IRM(B)-Kurven, die bis über Felder von 1.0 T keine Sättigung erreichen (Abb. BAL-4 und 5),
- $M_s(T)$ -Kurven mit Curietemperaturen von ca. 670°C, wie sie für Hämatit typisch sind (Abb. BAL-3),
- Ergebnisse der Erzmikroskopie: Hämatit tritt je nach Schnittlage in basalen Tafeln und als nadelförmiges Kristall in radial-

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

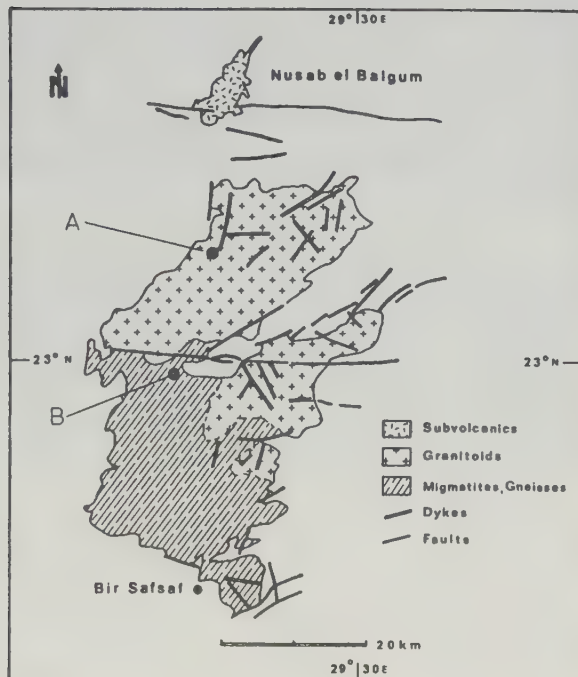
Abb. BAL 1: Übersichtskarte des Nusab el Balgum Komplex und des Bir Safsaf Grundgebirgsaufschlusses mit den Beprobungspunkten A und B (aus SCHANDELMEIER et al., 1983)

Abb. BAL 2: Histogramm der NRM-Intensität (halblogarithmischer Maßstab). Insgesamt wurden 192 Proben bearbeitet.

Abb. BAL 3: Für Hämatit kennzeichnende $M_s(T)$ -Kurve von Probe 71-2-1 mit einer Curietemperatur von ca. 670°C.

Abb. BAL 4 u. 5: IRM-Erwerbskurven und Koerzitivkraftspektren für die Proben 78-2-4-2 und 71-2-1. Deutlich ist das Vorhandensein einer hochkoerzitäven Phase. Sättigung ist auch bei Feldern von 1.2 Tesla nicht erreicht.

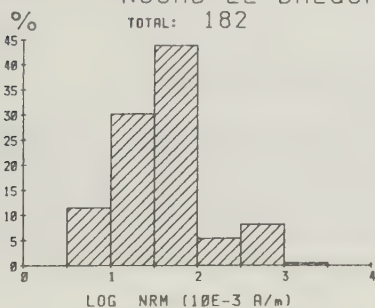
BAL 1



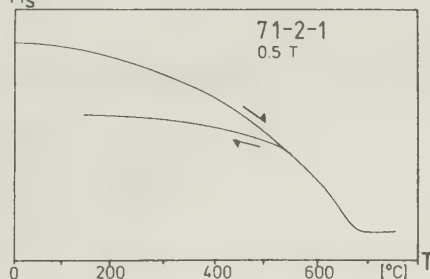
BAL 2

NUSAB EL BALGUM

TOTAL: 182

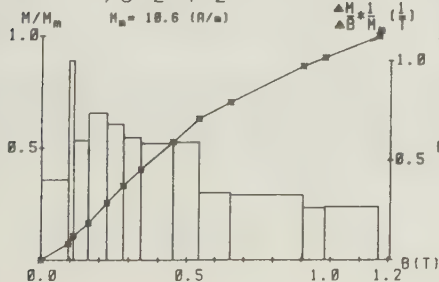


BAL 3

 M_s 

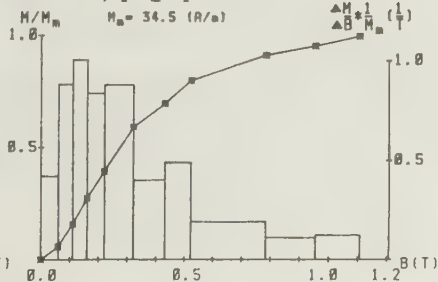
BAL 4

78-2-4-2

 $M_a = 18.6$ (A/m)

BAL 5

71-2-1

 $M_a = 34.5$ (A/m)

strahligen Aggregaten auf (Abb. BAL-10). Weiterhin wurden Titanit und in geringem Umfang Brauneisen (wahrscheinlich Goethit) festgestellt.

In Ergußgestein kann primärer Hämatit durch Oxidation während des Abkühlvorganges oder als spätvulkanische Bildung durch pneumatolytische bis hydrothermale Zersetzung von Eisenmineralien entstehen. Die nadelförmige Ausbildung weist hier auf den hydrothermalen Ursprung des Hämatits hin. Damit ist gezeigt, daß die Bildung des Hämatits und damit die CARM im engen zeitlichen Zusammenhang mit der Entstehung des Komplexes stehen.

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

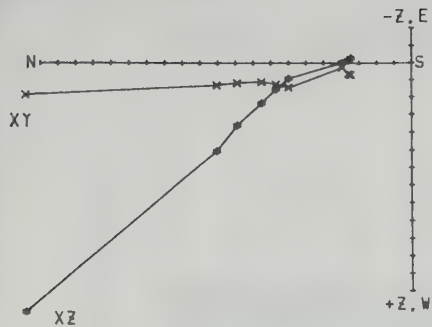
Abb. BAL 6 und BAL 7: Zijderveld-Diagramme und Abmagnetisierungskurven für thermische (links) und Wechselfeld- (rechts) Behandlung der Kerne 72-5 und 782-4. Aus Deutlichkeitsgründen sind in Abb. BAL 6 die Projektionen in die xz- und xy-Ebene gewählt, während in Abb. BAL 7 die yz- und xy-Ebene dargestellt werden. Wechselfeldbehandlung mit Feldstärken bis über 70 mT bewirkt keine völlige Abmagnetisierung.

Bilderklärung für die übernächste Seite:

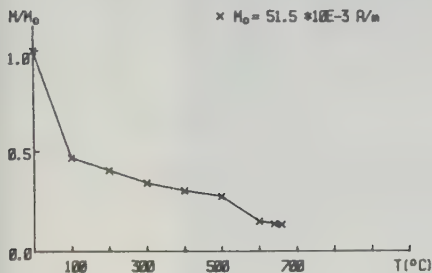
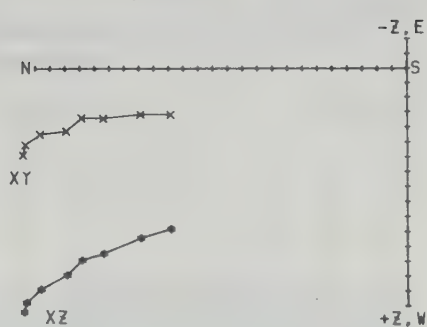
Tab. BAL I: Paläomagnetik Meßergebnisse an den Nusab el Balgum Subvulkaniten.

Abb. BAL 8 (links) und BAL 9 (rechts): Projektion der NRM Vorkommenmittel (BAL 8) und der CARM-Vorkommenmittel (BAL 9) im Schmidt'schen Netz. Für Abb. BAL 8 ist das Gesamt-mittel mittels Quadrat und Kreuz gekennzeichnet, der Konfidenzkreis ist eingetragen.

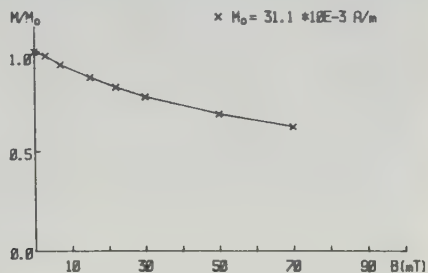
BAL 6

 $\rightarrow 2 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

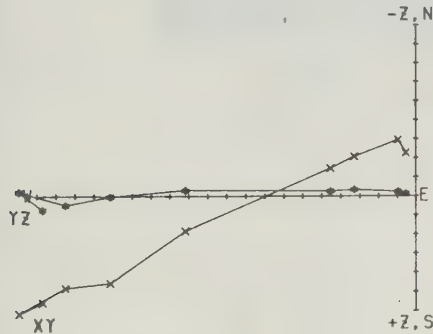
72- 5-2 CC

 $\times M_0 = 51.5 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$  $\rightarrow 1 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

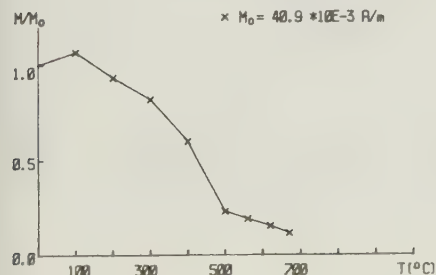
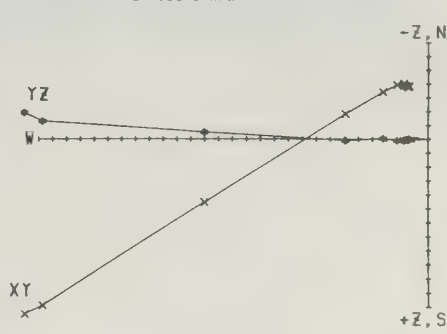
72- 5-1 CC

 $\times M_0 = 31.1 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

BAL 7

 $\rightarrow 2 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

782- 4-1 CC

 $\times M_0 = 40.9 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$  $\rightarrow 2 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

782- 4-2 CC

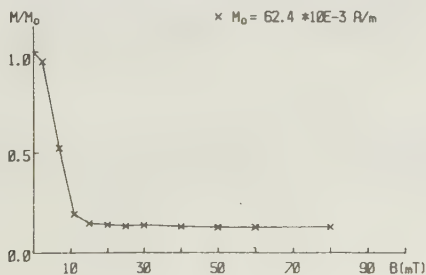
 $\times M_0 = 62.4 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

TABELLE BAL I

Paläomagnetik Ergebnisse von NUSAB EL BALGUM (23.31°N, 29.33°E)

-Vorkommenmittel-

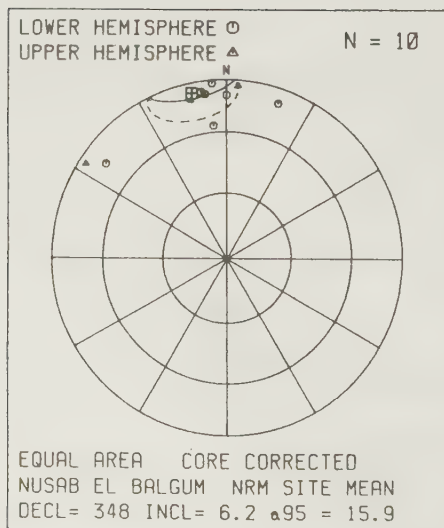
Vork Nr	MRM				TH(°C)				CARM				UGP	
	N	D	I	k					N	D	I	k	$\alpha 95$	(°N) (°)
70	19	351.2	6.4	298.6	500				16	350.3	1.8	553.1	1.6	65.7 233.4
71	17	18.8	9.3	3.1	500				11	348.0	-3.2	11.4	14.1	62.5 236.0
72	14	355.3	1.9	5.9	500				10	355.0	-6.6	22.0	10.5	63.0 220.3
73	24	4.0	-3.6	17.1	500				21	1.8	-9.4	28.9	6.0	61.9 205.6
74	11	347.1	-10.5	3.7	500				6	351.1	0.5	24.1	13.9	65.4 231.0
75	14	0.1	9.4	214.6	500				12	2.1	-0.5	233.5	2.8	66.4 204.0
76	14	354.5	26.4	2.0	400				13	347.5	-2.7	5.4	19.0	62.5 237.2
77	19	303.2	-4.6	2.3	400-675				16	342.9	-2.1	23.6	7.0	60.5 246.0
78	26	307.5	14.5	4.7	400-675				23	334.8	1.1	50.3	4.0	56.6 259.9
79	22	352.5	8.0	121.4	560				18	354.5	0.4	94.5	3.6	66.3 223.1

Mittel der Vorkommenmittel:
(alle normal)

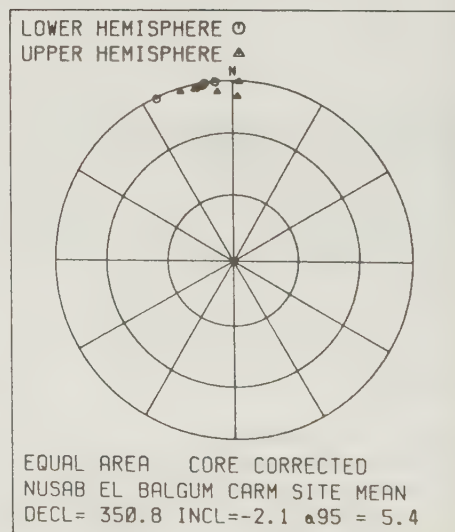
10 350.8 -2.1 81.2 5.4 64.1 230.7
N=92.0
A95= 5.1

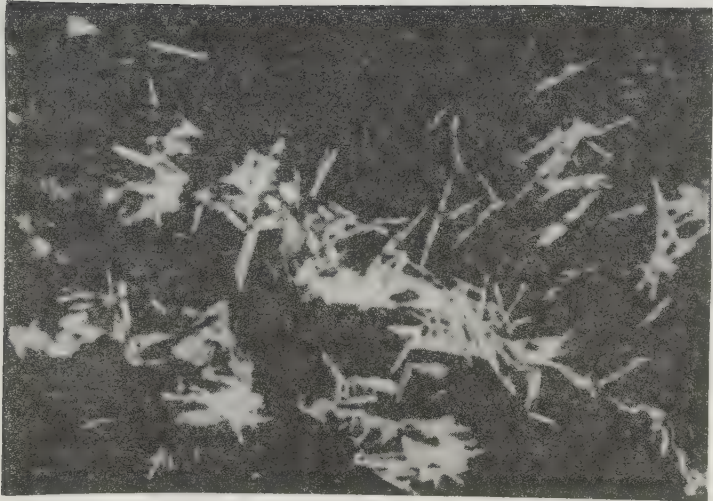
N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, K,k=Präzisionsparameter,
A95, $\alpha 95$ =Konfidenzwinkel: alle Winkelangaben in Grad

BAL 8



BAL 9





BAL.10: Anschliff: 79-2

Lokalität: Nusab el Balgum

Maßstab: 100 μ m

Nicols: parallel

Bem.: Aggregate nadelförmigen Hämatits

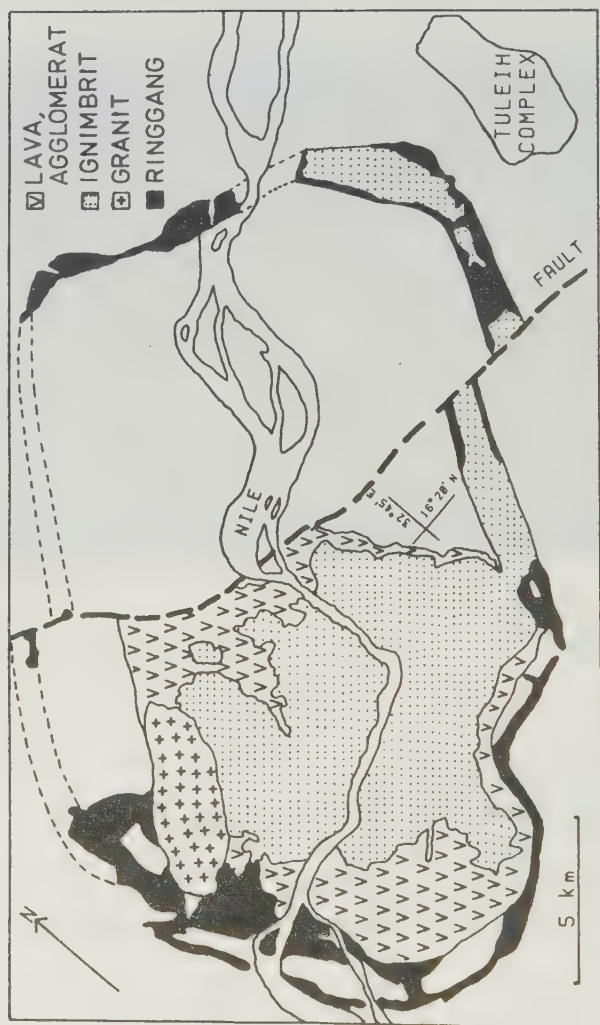


Abb. SAB 1: Geologische Übersichtskarte von Sabaloka- und Tuleih-Ringkomplex (verändert nach HARRIS et al., 1983).

5.2.3 Sabaloka

5.2.3.1 Geologie

Sabaloka ist einer der am besten aufgeschlossenen und relativ leicht erreichbaren Ringkomplexe (80 km nördlich von Khartum, siehe Abb. 8 u. 9). Sabaloka war Objekt einer Reihe von Studien: DELANY (1955, 1958) gibt eine erste geologische Beschreibung der Ringstruktur, eine detaillierte Geländestudie und Beschreibung der Petrographie ist von ALMOND (1977) publiziert, Schwereprofile wurden von SADIG et al. (1974) aufgenommen und eine Beurteilung des wirtschaftlichen Potentials liefert ALMOND (1967). Eine Reihe geochronologischer Studien liegt ebenfalls vor, diese werden weiter unten (in Tab SAB II) aufgeführt.

Der Sabaloka Komplex ist ein Cauldron-Komplex elliptischer Form mit den ungefähren Abmessungen von 15 x 20 km. Der ganze Komplex wird von einem Ringgang umfaßt. Eine geologische Übersichtskarte ist in Abbildung SAB-1 dargestellt.

Die auffälligste topographische Erscheinung ist ein in etwa rundes Plateau mit ca. 11 km Durchmesser, das bis zu 200 m über die umgebende Ebene aus Gneisen und älteren Graniten ragt. Durch das Plateau hat sich der Nil eine Schlucht geschnitten. Am Ende der Schlucht befindet sich der 4. Nilkatarakt, der Sabaloka-Katarakt.

Gesteine der Nubischen Serie verdecken im Nord-Westen Teile des Komplexes sowie den Jebel Rauwian, einen Berg unmittelbar im Süd-Westen des Plateaus.

Das Plateau besteht aus sauren Laven und Ignimbriten. Im Süden und Westen ist das Plateau umrandet von Hügeln des granitischen Ringgangs. Die Ringgang-Bruchzone verschwindet in Nord-Westen unter einer Bedeckung durch die Nubische Serie, im Nord-Osten wird jedoch, weit vom Plateau abgesetzt, die Fortsetzung durch niedrige Hügel aus mächtigen Granitblöcken angezeigt. Im Osten des Plateaus umfaßt die Ringbruchzone eine durch Absenkung erhalten gebliebene Sequenz vulkanischer Gesteine und wird deshalb als Graben bezeichnet.

Eine große, von Ost nach West verlaufende post-nubische Ver-

werfung durchtrennt den Cauldron und verursacht einen deutlichen Versatz der Ringbruchzone.

Wie die geologische Abfolge zeigt (Tab. SAB I) kann man einen früheren vulkanischen Zyklus von einem späteren Intrusivzyklus unterscheiden.

Tab. SAB I: Geologische Sequenz des Sabaloka-Komplex (vereinfacht nach ALMOND, 1977)

Lithologie	Alter
Nil-Tone, Sande, Kies	Känozoisch
Diskordanz.....	
Nubische Serie	Kreide
Diskordanz.....	
Ringgang (porphyrischer Mikrogranit)	
Glimmergranit	
Ignimbrit	
oberer Rhyolit	Paläozoikum
Katarakt-Formation (Vulkanoklastika)	
unterer Rhyolit	
basische Lava	
Schichtlücke.....	
subvulkanische Sedimente	u. Paläozoikum?
Diskordanz.....	
Basement	Proterozoikum- Archaikum

Die Subsidenz des zentralen Kessels aus Basement und bis zu 2 km mächtigen, vulkanischen Gesteinen erfolgte entlang der äußeren Zone der Ringbrüche. Zwei Hauptepisoden der Subsidenz führten zu der Bildung einer zentralen Caldera. Heute ist der zentrale Teil durch Reliefumkehr herausgehoben.

Das Schichteinfallen der Rhyolitlaven kann aus Fließerscheinungen ("flow featuring" und "flow banding") abgeleitet werden. Es gibt jedoch keine Möglichkeit, die ursprüngliche, nicht not-

wendigerweise horizontale Lage der Lavaflüsse von späteren Verstellungen zu trennen. Ähnliches gilt für die Ignimbrite, deren Lagebeziehung mittels eutaxitischer Foliation (ALMOND, 1977) und Abkühlungsklüften ("columnar jointing") festgestellt wird. Die Vulkanite fallen heute mit Werten bis zu 30° zum Zentrum der Caldera hin ein.

Der Kontakt der Ringbrüche zum umliegenden Gestein fällt sehr steil (ca. 70°-80°) ein.

Eine Liste der verfügbaren Altersbestimmungen wird in Tabelle SAB II gegeben. Ein mittel- bis unterdevonisches Alter kann für Sabaloka mittlerweile als recht gesichert angenommen werden.

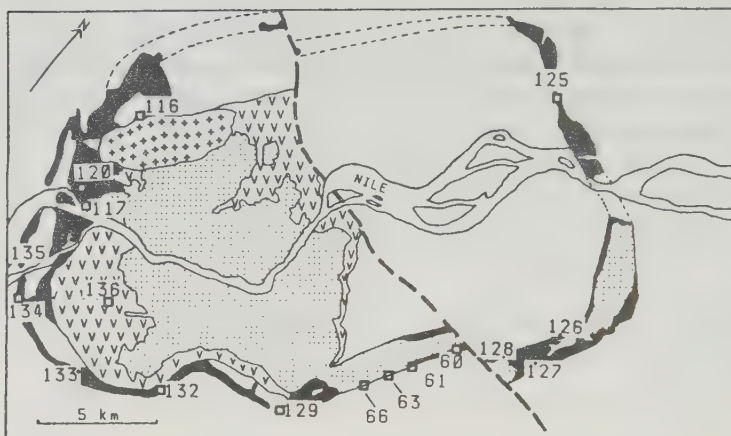
Tab. SAB II: Zusammenstellung der verfügbaren radiometrischen Altersbestimmungen des Sabaloka-Komplex:

Methode	Alter (Ma)	Lithologie	Referenz	Bemerkung
K/Ar	540±2	Mikrogranit	ALMOND 67	Gesamtgestein(=GG)
K/Ar	476±25	Mikrogranit	ALMOND 67	" "
K/Ar	337	Mikrogranit	VAIL u. REX 71	" "
Rb/Sr	352±10	o.Rhyolite	CAVANAGH 79	6 Pkt.-Isochr., GG
Rb/Sr	357±19	Mikrogranit	CAVANAGH 79	7 Pkt.-Isochr., GG
Rb/Sr	399±7	Rhyolit + Porphyry	BARTH et al. 83	3 Pkt.-Isochr., GG
K/Ar	370	Rhyolite	KREUZER 83 (cit. in BARTH et al. 83)	vorläufiges GG
Rb/Sr	383±14	Glimmergranit	HARRIS et al. 83	4 Pkt.-Isochr., GG
K/Ar	in.Vorb.	kontaktmetam. Sedimente	HORN u. MÜLLER- SOHNUS 86	GG und Mineral- alter

5.2.3.2 Paläomagnetik-Vorarbeiten

Die von BRIDEN (1973) und CAVANAGH (1979) bestimmten Paläopositionen für Sabaloka sind nicht vereinbar mit den radiometrischen Altersdaten:

SAB 2



SAB 3

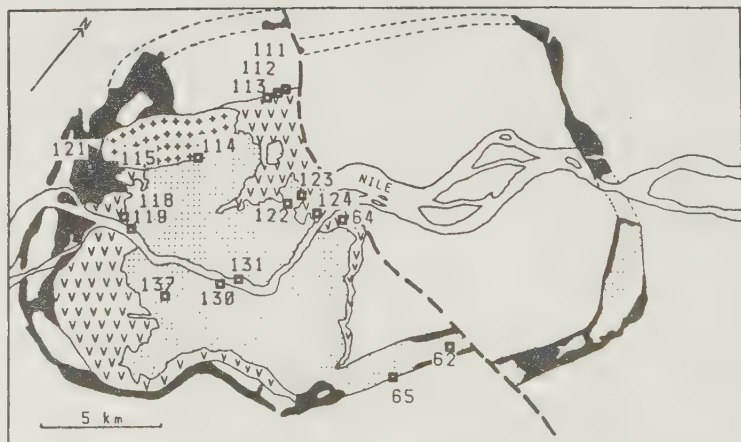


Abb. SAB 2 u. SAB 3: Karten der beprobten Vorkommen im Mikrogranit des Ringdykes (SAB2) und in allen weiteren Lithologien (SAB3). Legende wie in Abb. SAB 1. Siehe auch Tabelle SAB III.

In einer Pilotstudie sammelte BRIDEN (op.cit.) 21 Proben von Ignimbriten und Basaltlaven aus 2 Arbeitsgebieten innerhalb des Ringgangs. Die Wechselfeldentmagnetisierung der Proben liefert eine mittlere Richtung von Dekl=350°E und Inkl=26° und eine dazugehörige Paläopollage von 83°N, 21°W. Damals wurde von BRIDEN 710 ± 50 Ma als beste Schätzung des Alters angegeben, basierend auf Interpolation zu anderen Pollagen Afrikas.

Das Schichteinfallen innerhalb und zwischen den beiden Arbeitsgebieten ist unterschiedlich und wird von BRIDEN zu einer Art Faltungstest verwandt. Die Streuung aller NRM-Probenrichtungen wird auf dem 95 Prozent Vertrauensniveau durch Korrektur der Kippung reduziert. BRIDEN interpretiert dies als Beweis für die primäre Natur der Magnetisierung.

Auch CAVANAGH (op. cit.) konnte diesen Widerspruch nicht auflösen. Er erhielt an Proben von Mikrogranit, Rhyolit und Ignimbrit ebenfalls die von BRIDEN bestimmte Richtungskomponente der Magnetisierung. Korrektur der Verkippung und Faltungstest führen hier jedoch zu keinem eindeutigen Ergebnis bezüglich primärer Natur der Remanenz.

Diese Diskrepanz von Paläomagnetik und Radiometrie war Ausgangspunkt für eine nochmalige, gründliche Beprobung und Analyse.

5.2.3.3 Beprobung

Es wurden 2 Beprobungsfahrten des Sabaloka-Komplexes durchgeführt. Bei der Auswertung der Messungen der 1. Kampagne hat sich gezeigt, daß

- a. eine bisher unentdeckt gebliebene, sehr kleine Magnetisierungskomponente in manchen Vorkommen vorhanden ist, und daß
- b. das vorhandene Material sowohl was Quantität, geographische Verteilung als auch Auswahl der Lithologie angeht, noch nicht ausreicht, um diese Komponente befriedigend zu dokumentieren.

Eine 2.Beprobung wurde unternommen und es liegt jetzt eine umfangreiche Probensammlung aller Lithologien vor; alle Bereiche des Ringkomplexes, d.h. nun auch Westufer, Plateauzentrum und nördlicher Ringgang, sind abdeckt (Abb. SAB-2 und 3). Schwerpunkt hierbei war die Beprobung der Ignimbrite, die eine gute Kontrolle der Lagebeziehung erlauben, und der späten Ringgang-Intrusion.

Tab. SAB III: NRM-Meßergebnisse für den Sabaloka-Komplex.

Paläomagnetik Ergebnisse von SABALOKA RING KOMPLEX (16.3°N, 32.6°E)
-Vorkommenmittel-

Vork Nr	NATÜRLICHE REMANENZ N/n	D	I	k	Lithologie	tekt.Lage: Fallpfeil Streichen/Fallen
60	13/8	344.7	23.2	27.8	Ringdyke	
61	11/9	334.6	-1.5	8.8	Ringdyke	
62	19/10	8.1	21.9	2.8	Ignimbrit	tekt.Lage unklar
63	22/9	349.3	22.1	30.1	Ringdyke	
64	12/8	2.6	26.7	9.1	Rhyolit	
65	12/9	351.8	30.8	173.8	Ignimbrit	tekt.Lage unklar
66	13/8	349.8	12.4	2.4	Ringdyke	
67	19/9	358.5	34.9	5.8	Ringdyke	
111	32/10	69.5	5.6	7.3	kontaktmetam. Sediment	horizontal
112	12/7	344.8	21.8	4.8	Rhyolit	
113	21/7	69.8	-33.8	5.1	kontaktmetam. Sediment?	90° 15° E
114	zu schwache Magnetisierung				Granit	
115	zu schwache Magnetisierung				Granit	
116	12/7	9.6	13.2	2.6	Ringdyke	
117	8/7	45.8	-15.6	1.4	Ringdyke	
118	10/8	346.3	42.8	42.6	Rhyolit	
119	14/8	357.6	-35.8	41.1	Ignimbrit	horizontal
120	15/7	8.1	14.4	14.8	Ringdyke	
121	18/8	356.6	-6.5	15.1	Felsischer Gang	
122	17/8	349.8	-19.8	33.3	Ignimbrit	horizontal
123	14/8	23.4	31.5	2.7	Rhyolit/Ignimbrit	118° 18° E
124	18/10	16.8	19.1	2.8	Agglomerat	
125	19/8	29.4	30.3	3.3	Ringdyke	
126	13/7	322.4	-34.8	2.8	Ringdyke	
127	10/7	133.8	2.54	1.8	Ringdyke	
128	14/7	337.3	18.8	3.1	Ringdyke	
129	13/7	346.1	21.8	3.9	Ringdyke	
130	13/7	352.3	8.8	6.8	Ignimbrit	horizontal
131	19/9	356.7	4.5	14.2	Ignimbrit	horizontal
132	16/7	10.1	-27.2	2.6	Ringdyke	
133	13/7	318.1	9.4	2.8	Ringdyke	
134	18/8	345.3	-48.9	2.7	Ringdyke	
135	11/7	353.3	-8.2	5.8	Ringdyke	
136	19/8	2.5	21.1	4.3	Ringdyke	
137	15/8	327.9	1.8	53.6	Ignimbrit	218° 18° W

Mittel aller Vorkommen D = 358.8 I = 7.5
 (ohne 114, 115, 127) N = 32
 k = 6.1
 α_{95} = 11.2

Mittelung über N=Probenzahl, n=Zahl der Kerne, D=Deklination, I=Inklination,
 k=Präzisionsparameter, α_{95} =Konfidenzwinkel, alle Winkelangaben in Grad

5.2.3.4 Paläomagnetik

Die breite Verteilung der NRM-Intensitäten spiegelt die unterschiedlichen, beprobten Lithologien wieder (Abb. SAB-4). Während die Granite aus Vorkommen 114 und 115 mit Intensitäten kleiner $1.0 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ nicht mehr bearbeitet werden konnten, zeigen Ignimbrite, Rhyolite und die Mikrogranite des Ringdykes gut meßbare Magnetisierungsintensitäten. Kontaktmetamorphe Sedimente und zum Teil auch der Mikrogranit des Ringdykes erreichen Magnetisierungsintensitäten von über $30 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$.

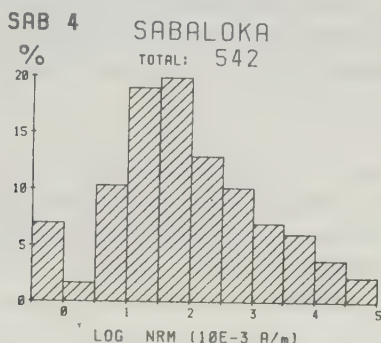


Abb. SAB 4: NRM-Intensitätsverteilung (halblogarithmischer Maßstab). Insgesamt wurden 542 Proben aus 2 Beprobungsfahrten bearbeitet.

Die mittleren, in situ NRM-Richtungen der Vorkommen sind in unterschiedlichem Maß mit Präzisionsparametern k von Werten unter 3 bis über 100 definiert und gruppieren um ein Gesamtmittel von $\text{Dekl}=358^\circ$ und $\text{Inkl}=7.5^\circ$ mit einem Konfidenzwinkel $\alpha_{95}=11.2^\circ$. Kenndaten der NRM sind ersichtlich aus Tabelle SAB III und in Abbildung SAB-10 sind die NRM-Vorkommenmittel projiziert.

In Tabelle SAB III sind zusätzlich die Lagebeziehungen der Vorkommen - soweit aus Fließstrukturen und Foliation her bekannt - mit aufgenommen. Dies kann, wie oben ausgeführt, nur für die Vulkanite durchgeführt werden. Für Ringgang und Granit als letzte Phasen der Ringintrusion kann angenommen werden, daß sie von Subsidenz und Verkipnungen nicht mehr betroffen sind.

Detaillierte Entmagnetisierungsversuche wurden an mehreren Proben jedes Vorkommens durchgeführt. Auf eine ausführliche Be-

schreibung muß hier verzichtet werden.

3 Komponenten der Magnetisierung können sicher neben einer unbedeutenden, kurzfristig erworbenen VRM identifiziert werden:

- Nord-positiv (N+) Komponente, nördlich und abwärts: Sie wird von einer hochkoerzitativen (Abb. SAB-6, Probe 129-7-2) und bis 650°C nachweisbaren (Abb. SAB-5, Probe 128-3-2) Phase getragen.

- Süd-negativ (S-) Komponente, südlich und aufwärts, antiparallel zu der N+ Komponente: Diese Komponente liegt entweder allein oder überlagert von einer geringeren oder größeren (Abb. SAB-7, Kern 67-8), weniger stabilen N+ Komponente vor. Die S- Komponente hat ebenfalls Blockungstemperaturen bis 650°C und ist durch hohe Koerzitivkräfte ausgezeichnet.

- eine weitere Richtung kann bei einem Teil der Vorkommen nachgewiesen werden: eine Nord-negativ (N-) Komponente, nördlich und aufwärts. Diese Komponente ist meist sehr klein und von einer großen N+ Komponente überdeckt (Abb. SAB-8, Probe 62-2-2). Sie wird hier nur durch thermische Reinigung herauspräpariert. Im Beispiel Kern 122-8 (Abb. SAB-9) ist der N- Vektor dominierend mit Blockungstemperaturen bis über 600°C und Koerzitivkräften bis über 90mT.

An 26 Vorkommen wurde die N+ bzw S- Remanenzrichtung nachgewiesen. Wechselfeldentmagnetisierung mit Feldern bis zu 50 mT

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

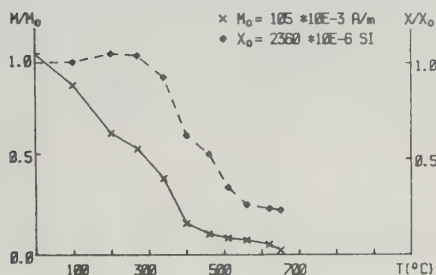
Abb. SAB 5 und SAB 6: Zijdeveld-Diagramme und Abmagnetisierungskurven mit Verlauf der Suszeptibilität von den Proben 128-3-2 und 129-7-2, die beides Träger der N+ Komponente sind. Nur die thermische Behandlung führt zu vollständiger Abmagnetisierung.

Abb. SAB 7: Der Kern 67-8 als Beispiel für das gemeinsame Vorliegen der N+ und der dazu inversen S- Komponente. Dargestellt sind Zijdeveld-Diagramme und Abmagnetisierungskurven für thermische (links) und Wechselfeld-(rechts) Behandlung. Bei Temperaturen bis 250°C wird die antiparallele N+ Komponente abgebaut, erkennbar an der Zunahme der Magnetisierungsintensität. Wechselfeldbehandlung mit Spitzenfeldstärken bis zu 90 mT führt zu einem Abbau der N+ Komponente, die S- Komponente der Magnetisierung bleibt unberührt.

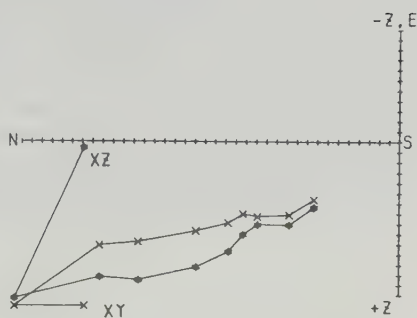
SAB 5

 $\rightarrow 1 \cdot 10^{-2} \text{ A/m}$ 

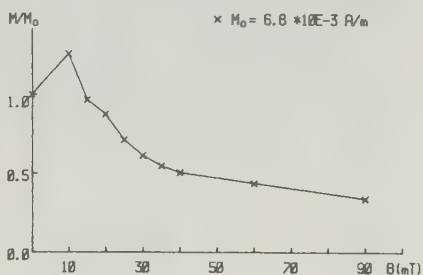
128- 3-2 CC



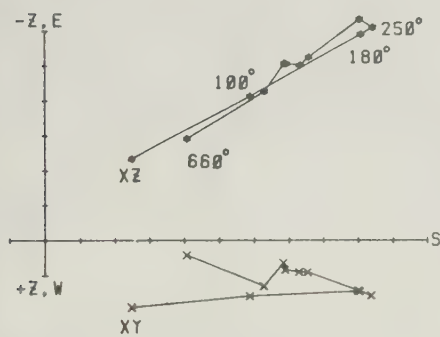
SAB 6

 $\rightarrow 2 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}$ 

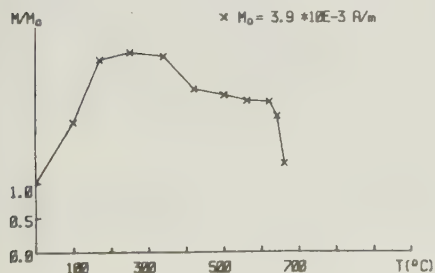
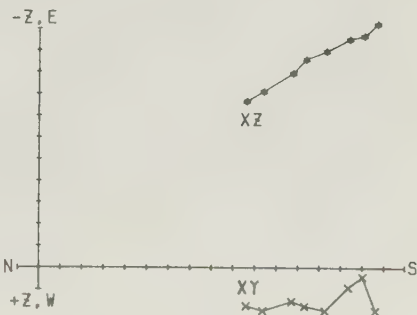
129- 7-2 CC



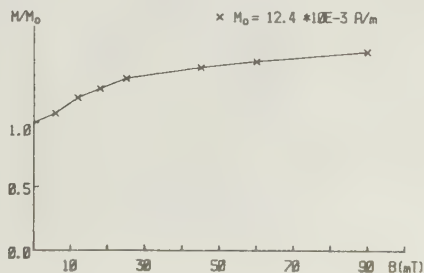
SAB 7

 $\rightarrow 1 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

67- 8-1 CC

 $\rightarrow 1 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$ 

67- 8-2 CC



baut eine überlagernde, viskose Remanenz ab und verringert die Streuung der Richtungen innerhalb der Vorkommen beträchtlich (Tab. SAB IV) und als Gesamtmittel über $N=26$ erhält man $Dekl=357.5^\circ$ und $Inkl=26.1^\circ$ mit $k=16.5$ und $\alpha_{95}=7.2^\circ$.

Diese Remanenzrichtung entspricht innerhalb der Fehlermargen dem von BRIDEN (op.cit.) und CAVANAGH (op.cit.) erhaltenen Ergebnis.

An 9 Vorkommen (5 Ignimbrite, 3 Ringdykes und 1 Sediment: 65 Kerne, 102 Proben) konnte die weiter unten als primär interpretierte Remanenzkomponente N- identifiziert werden (Tab. SAB V und Abb. SAB-11). Die Mittelung der Vorkommenmittelwerte ergibt $Dekl=340.2^\circ$ und $Inkl=-41.8^\circ$ sowie eine dazugehörige Pollage von $43.5^\circ S$ und $55.8^\circ E$ mit $K=16.2$ und $\alpha_{95}=13.2^\circ$. Alle 9 Vorkommen sind normal magnetisiert.

Bei Vorkommen 130 (Abb. SAB-12) ergibt sich ein Hinweis auf das Vorhandensein einer vierten, zu N- inversen Komponente: eine Süd-Positiv (S+) Komponente. Jedoch konnte eine stabile Endrichtung nicht erreicht werden und aus den zum Teil intermediären Richtungen kann kein sinnvoller Mittelwert gebildet werden.

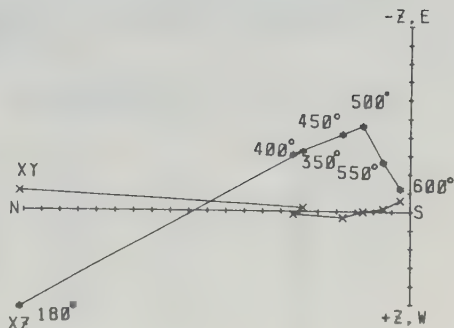
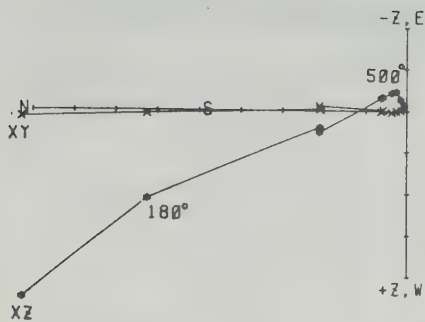
Die N- Richtung konnte mittlerweile von BRIDEN in seiner und CAVANAGHs Probensammlung von 1971 und 1974 ebenfalls identifiziert werden. Er erhält an 5 Vorkommen und 17 Proben eine mittlere, vorläufige Richtung von $Dekl=337.7^\circ$ und $Inkl=-50.3^\circ$ mit $k=116$ und $\alpha_{95}=7.1^\circ$ (BRIDEN, pers.Mittl., 1986), die in sehr guter Übereinstimmung mit dem Ergebnis dieser Arbeit steht. Die Existenz einer dazu inversen Komponente S+ bleibt auch bei BRIDEN unsicher.

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

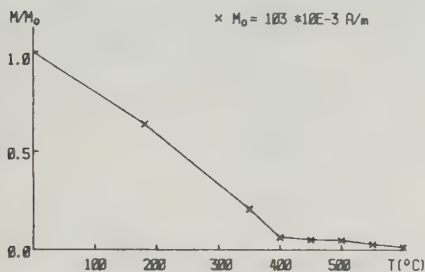
- Abb. SAB 8: Die Probe 62-2-2 als Beispiel für eine Magnetisierung, die aus einer großen N+ und einer kleineren, aber stabileren N- Komponente zusammengesetzt ist. Dargestellt sind Zijdeveld-Diagramm (links oben), Ausschnittsvergrößerung des Zijdeveld-Diagramms (rechts oben), Richtungsvektoren im Schmidt'schen Netz (rechts unten) und Abmagnetisierungskurve (links unten) für thermische Behandlung. Hier führt thermische Behandlung mit $500^\circ C$ zur Herauspräparation der N- Komponente. Die Magnetisierungsintensität ist dabei auf weniger als 10% des Anfangswerts reduziert worden.
- Abb. SAB 9: Dominierender N- Vektor in Kern 128-8. Sowohl thermische (links) wie Wechselfeld- (rechts) Behandlung weisen die N- Komponente nach. Dargestellt sind Zijdeveld-Diagramme und Abmagnetisierungskurven mit Messkurve der Suszeptibilität.

SAB 8 $\rightarrow 1 \cdot 10E-2 \text{ A/m}$

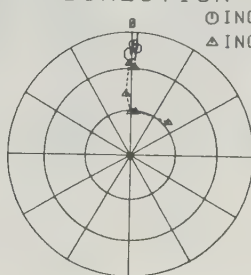
$\rightarrow 1 \cdot 10E-3 \text{ A/m}$



62- 2-2 CC

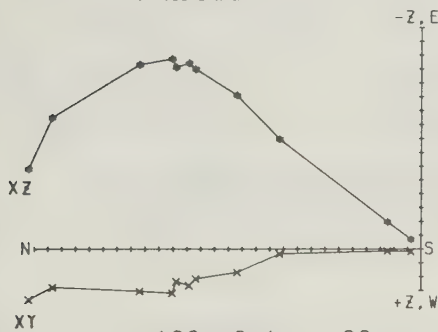


DIRECTION



SAB 9 $\rightarrow 1 \cdot 10E-2 \text{ A/m}$

$\rightarrow 1 \cdot 10E-2 \text{ A/m}$



122- 8-1 CC

122- 8-3 CC

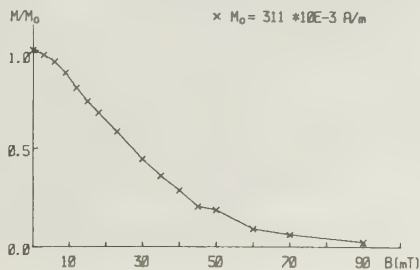
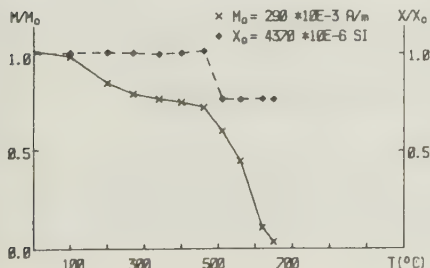


TABELLE SAB IV

Paläomagnetik Ergebnisse von SABALOKA RING KOMPLEX (16.3°N, 32.6°E)
-Vorkommennittel-

Vork Nr	Af (mT)	SEKUNDÄRE REMANENZ			k	α_{95}	Bemerkung
		N/n	D	I			
60	17	12/8	358.9	14.8	46.0	6.5	
61	18	18/8	349.1	-25.8	15.0	12.9	
62	25	17/9	356.8	11.3	51.2	5.1	
63	28	16/9	352.3	25.8	102.1	3.7	
64	18	11/8	5.6	28.6	68.2	5.9	
65	20	12/9	347.7	25.3	168.7	3.4	
66	17	12/8	352.1	5.2	68.5	5.7	
67	20	17/9	186.2	-30.3	86.2	3.9	16 invers
112	15	8/7	357.6	25.8	47.3	8.1	
116	20	6/5	345.0	44.6	5.2	32.5	5 invers
117	20	5/5	12.0	13.7	2.5	--	1 invers
118	15	9/8	353.5	54.2	18.7	12.2	
120	18	7/6	5.1	48.9	12.6	17.7	
121	8	18/8	356.6	-6.5	15.1	9.2	
123	15	6/5	336.11	37.3	11.3	20.8	
124	40	13/10	349.0	31.5	10.8	13.2	
125	30	6/5	24.9	31.9	11.3	20.8	
126	30	4/4	3.1	33.1	6.1	48.5	
127	20	7/6	9.7	55.2	4.3	32.8	2 invers
128	25	7/7	349.3	14.4	21.9	13.2	
129	18	8/6	352.8	35.5	15.6	14.5	4 invers
132	20	7/6	8.4	27.1	23.1	12.8	3 invers
133	15	5/5	1.4	26.0	11.1	24.1	1 invers
134	50	9/5	5.5	48.8	7.0	28.9	
135	20	7/6	351.5	7.5	8.4	22.0	
136	28	9/7	359.5	28.3	16.4	13.1	2 invers
Mittel aller Vorkommen			357.5	26.1	16.5	7.2	N = 26

Polposition 86.5°N, 256.1°E $dp = 4.2$ $dm = 7.7$

Mittelung über N=Probenzahl; Polposition aus dem Mittelwert der Richtungen berechnet; n=Zahl der Kerne, D=Deklination, I=Inklination, k=Präzisionsparameter, α_{95} =Konfidenzwinkel, dp und dm=Parameter der Pollagen Fehlerellipse; alle Winkelangabe in Grad

Tab. SAB IV: Kenndaten der sekundären (N+ u. S-) Remanenzrichtung für Sabaloka.

Tab. SAB V (gegenüberliegende Seite): Kenndaten der primären (N-) Remanenzrichtung, wie sie an 9 Vorkommen erhalten wurde. Die Pollagen sind für die Süd-Hemisphere angegeben. Die Angaben der Behandlungsstufe (mT bei Wechselfeld- und °C bei thermischer Behandlung) sind Durchschnittswerte.

Abb. SAB 10 und SAB 11 (gegenüberliegende Seite): Projektion der NRM-Vorkommennittel (SAB 10) und der CARM-Vorkommennittel (SAB 11) im Schmidt'schen Netz. Das jeweilige Gesamtmedium ist durch eine Raute gekennzeichnet und von dem Vertrauenskreis umgeben.

TABELLE SAB V

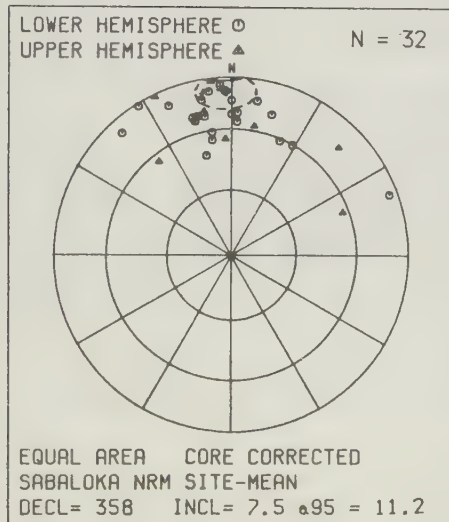
Paläomagnetik Ergebnisse von SABALOKA RING KOMPLEX (16.3°N, 32.6°E)
-Vorkommenmittel-

Vork Nr.	Th/Ar (°C, mT)	CHARAKTERISTISCHE REMANENZ kernkorrigiert						lagekorrigiert	UGP ¹⁾ (°S) (°E)	
		N/n	D	I	k	α95	D	I		
61	300°	8/8	4.8	-68.6	14.5	15.1	unverändert		21.6	29.4
62	400°	15/9	339.6	-57.5	27.4	7.4	" "		32.3	51.5
66	300°	11/7	351.3	-33.7	13.7	12.8	" "		54.2	46.8
113	25	11/7	354.5	-36.0	22.9	9.7	344.2	-33.2	53.3	41.2
119	350°	13/8	354.5	-57.8	237.8	2.7	unverändert		35.0	37.8
122	350°	17/8	344.3	-32.6	131.6	3.1	" "		52.6	57.7
130	Streuung, Hinweis auf inverse Komponente									
131	490°	9/7	326.7	-11.3	15.9	13.3	" "		50.3	91.5
134	50	5/3	327.3	-51.6	7.5	30.0	" "		32.2	65.2
137	480°	13/8	319.7	-19.1	40.6	6.6	322.5	-26.6	42.3	92.1
Mittel: N = 9			348.2	-41.8			339.4	-42.1	43.5	55.8
			k=13.6				k=15.4		M=16.2	
			α95=14.5				α95=13.6		A95=13.2	

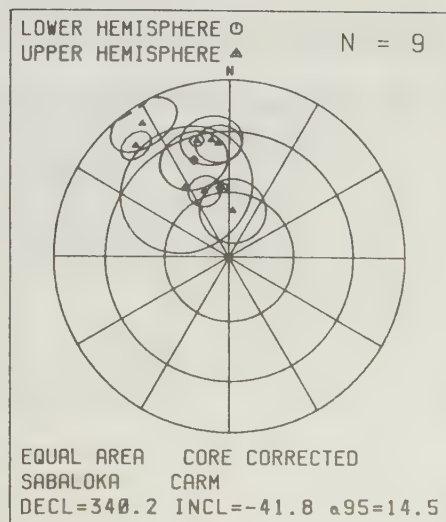
1) Berechnung aus den kernkorrigierten Vorkommenrichtungen

Mittelung über N=Probenzahl, n=Zahl der Kerne, D=Deklination, I=Inklination,
K, k = Präzisionsparameter, A95, α95 = Konfidenzwinkel; alle Winkelangaben
in Grad

SAB 10



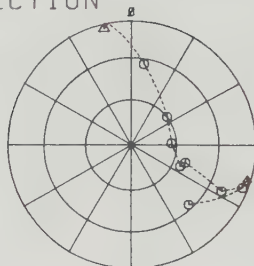
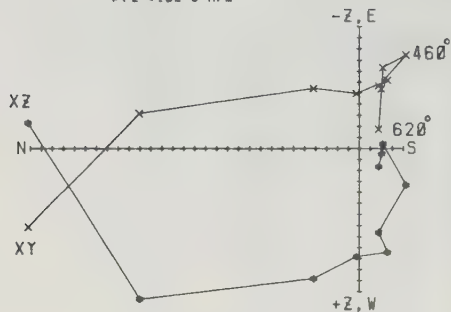
SAB 11



SAB 12

$\mu = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$

DIRECTION



○ INCL > 0
△ INCL < 0

130- 6-1 CC

DIF-VECTOR

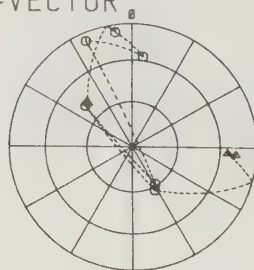
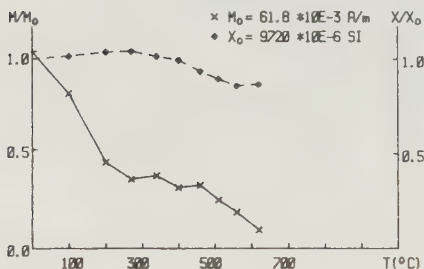


Abb. SAB 12: Bei Proben des Vorkommens 130 (hier Probe 130-6-1) ergibt sich Hinweis auf die Existenz einer S+ Komponente. Jedoch konnte i.a. keine definierte Endrichtung erhalten werden. Dargestellt sind Zijderveld-Diagramm (links oben), Projektion der Richtungsvektoren (rechts oben) und Differenzvektoren (rechts unten) im Schmidt'schen Netz sowie die Abmagnetisierungskurve und die Suszeptibilitätsmesswerte (links unten).

5.2.3.5 Gesteinsmagnetik

2 Typen von IRM(B)-Kurven konnten aufgenommen werden:

- Kurven mit Sättigung bei 0.3 bis 0.4 T (Abb. SAB-13 und 14, Proben 62-2-1, 63-6-1)
- Kurven mit fast kontinuierlichem Anstieg der IRM bis über 1.0 T hinaus (Abb. SAB-17 und 18, Proben 67-6-3, 66-1-1)

Eine Korrelation des Kurventyps mit dem Vorhandensein oder Nichtvorhandensein der N- Komponente ist nicht gegeben.

Nur Proben des ersten Typus waren geeignet zur Messung der Curietemperatur mittels $M_s(T)$ -Kurve. Bei allen anderen Proben konnte kein deutlich den Paramagnetismus der Matrix übersteigendes Meßsignal aufgenommen werden. Eine Extraktion des magnetischen Materials ist nicht möglich, da der Erzgehalt sehr gering ist und fast ausschließlich Hämatit mit geringer Sättigungsmagnetisierung vorliegt.

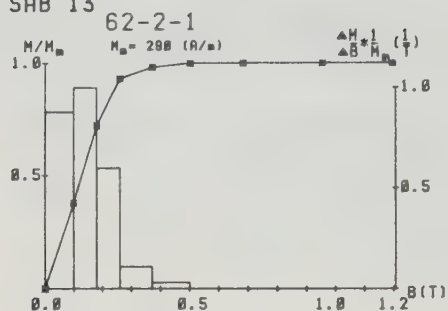
Die gemessenen Curietemperaturen von 300°-400°C in Kombination mit einem sogenannten "kink" bei 150° sowie die von 560°C deuten auf Maghemit und Magnetit als magnetische Minerale hin (Abb. SAB-15 und 16). Maghemit wird durch Tieftemperaturoxidation aus Magnetit gebildet., Maghemit zerfällt bei 300-400°C irreversibel zu Hämatit, wie die Rücklaufkurve zeigt.

Neben Magnetit und Maghemit kann Hämatit aus Entmagnetisierungsversuchen als Remanenzträger eindeutig identifiziert werden. Bei IRM(B)-Erwerb und $M_s(T)$ -Kurve bleibt Hämatit jedoch aufgrund seiner um ca. 500-mal geringeren Sättigungsmagnetisierung unentdeckt.

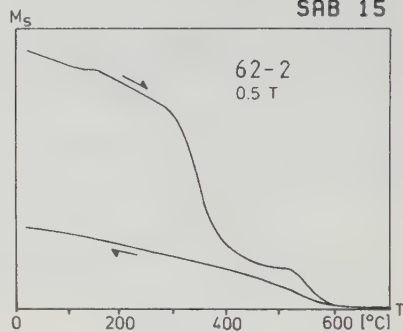
Auch die Erzmikroskopie erlaubt keine Unterscheidung zwischen Proben mit und ohne N- Komponente: Beobachtet wurden größere (40-400µm) und kleinere (bis 8 µm) Erzkörner:

- Körner mit einem Hämatit-Saum und einem Pseudobrookit-Kern. Diese wurden aus ehemaligen Titanomagnetiten (nur noch an der äußeren Form erkennbar) bei hohen Temperaturen durch Oxidation gebildet (EL GORESY, pers.Mittl., 1986). Dies sind Bedingungen wie sie nur bei der Extrusion der Vulkanite geherrscht haben können. Eine sekundäre Entstehung dieses Hämatits durch Verwitterungsprozesse kann ausgeschlossen werden. Dieser Hämatit

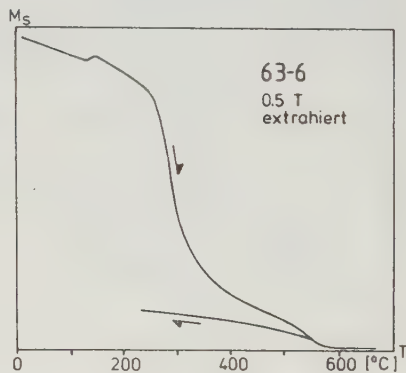
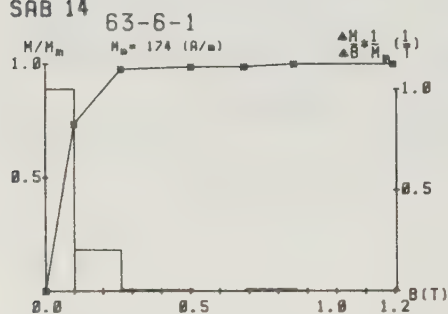
SAB 13



SAB 15

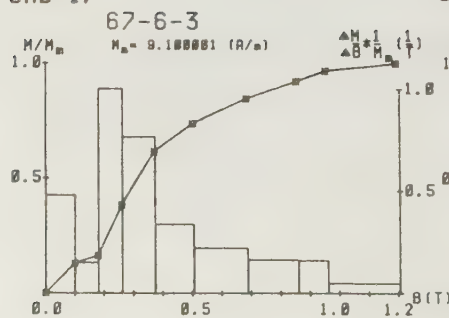


SAB 14

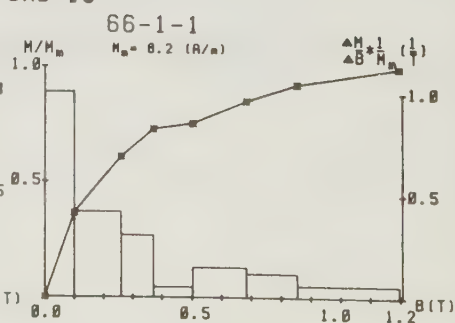


SAB 16

SAB 17



SAB 18



wird als Träger der primären Magnetisierung angesehen.

- Titanarmer Magnetit mit einem eventuell noch vorhandenen, primären Gitter. Er kommt ebenfalls als Träger einer primären Magnetisierung in Frage.

Der überwiegende Erzanteil ist jedoch durch sekundäre Bildungen bestimmt:

- Maghemit-Hämatit-Gemisch, teilweise mit Brauneisenverwachsungen: Überbleibsel eines stark umgewandelten (Titano-) Magnetits

- vollständig zu einem Netzwerk aus Hämatit und Brauneisen martitisierte (Titano-) Magnetite

- Hämatit, meist stark angegriffen, zum Teil mit Ilmenit und Leukoxen-Netzwerk. Er ist ein Rest von primärem Hämatit oder ist durch Martitisierung aus Magnetit entstanden.

- kleine Hämatitkörner, sie sind möglicherweise primär durch Oxidation entstanden. Eine genaue Aussage läßt sich wegen der geringen Größe nicht treffen.

- und akzessorisch primärer Ilmenit und Sulfid.

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb. SAB 13 und SAB 14: IRM-Erwerbskurven und Koerzitivkraftspektren der Proben 67-6-3 und 66-1-1. Sättigung wird bei ca. 0.3 bis 0.4 Tesla erreicht. Thermomagnetische Kurven am Material derselben Kerne in Abb. SAB 15 und SAB 16.

Abb. SAB 15 und SAB 16: $M_s(T)$ -Kurven an magnetisch extrahierten Material der Kerne 62-2 und 63-6. Auffällig sind der sogenannte "kink" bei ca. 150°C sowie die Curiepunkte von ca. 350°C und 560°C. Dies sind Hinweise für das Vorhandensein von Maghemit und Magnetit als magnetische Minerale.

Abb. SAB 17 und SAB 18: IRM-Erwerbskurven und Koerzitivkraftspektren am Beispiel der Proben 67-6-3 und 66-1-1 wie sie für den hochkoerzitativen Hämatit zu erwarten sind. Eine magnetische Extraktion und die Aufnahme thermomagnetischer Kurven war hier nicht möglich.

5.2.3.6 Interpretation

Die N+/S- Komponente der Remanenz ist statistisch nicht unterscheidbar von der heutigen Richtung des geozentrischen axialen Dipolfelds in Sabaloka. Sie wurde rezent oder im Tertiär von einem Maghemit-Hämatit-Gemisch, wie es bei chemischen Verwitterungsvorgängen entsteht, erworben.

Dies wird durch einen Konglomeratstest bestätigt: An Vorkommen 124 wurden die groben, vulkanischen Pyroklastika der Katarakt-Formation beprobt. Es handelt sich hier um grob geschichtete, vulkanische Brekzien mit bis zu 2 m großen Blöcken, die fast ausschließlich aus Rhyolit bestehen. ALMOND (op.cit.) hält diese Klastika für Ablagerungen von gewaltigen Schlammströmen ("sheet flood") oder Muren ("mudflows"). Aus 10 Rhyolit-Blöcken wurden Kerne für einen Konglomeratstest gezogen: Wechselfeldbehandlung der Proben liefert eine gut definierte N+ Komponente mit einem Präzisionsparameter von $k=10.8$ (TAB IV). Der Konglomeratstest ist negativ, die Richtungen sind nicht statistisch verteilt wie es bei einer primären, stabilen Magnetisierung zu erwarten gewesen wäre.

Der Faltentest von BRIDEN (op.cit.), der die primäre Natur dokumentieren sollte, ist nicht aussagekräftig: Die Voraussetzung einer Fisherverteilung ist, wie BRIDEN selbst äußert, nicht streng erfüllt und betrachtet man die Streuung der beiden Arbeitsgebiete separat, so ist sowohl bei der NRM wie bei der im Wechselfeld-behandelten Remanenz der Faltentest nicht statistisch signifikant bzw. negativ.

Bestätigt wird dies von CAVANAGH (op.cit.), der ebenfalls Lagekorrekturen an seinen Ergebnissen durchführt und damit keine Verringerung der Streuung erreicht.

Die Existenz einer antiparallelen S- Komponente dokumentiert hier das langsame Entstehen der sekundären Magnetisierung während mindestens einer Feldumkehr.

Die N- Komponente wird zur Hauptsache von primärem Hämatit getragen. Hämatit bildet sich in Ergußgestein durch Oxidation während des Abkühlvorgangs (RAMDOHR, 1960). So beschreiben

ZIJDERVELD et al. (1970) primären Hämatit in Ignimbriten am Beispiel des Bozener Quarzporphyrs.

Die N- Komponente kann nur an einem Teil der Vorkommen nachgewiesen werden und zwar dann, wenn sie nicht stark oder ganz von einer sekundären Magnetisierung verdrängt wurde.

Die in situ N- Komponente ist über den ganzen Komplex verteilt dokumentiert. Sie liegt vor in horizontalen und subhorizontalen Ignimbriten und Laven. Sie liegt ebenfalls vor in Ringdyke-Graniten, bei denen Lageverstellungen aus oben erwähnten Gründen unwahrscheinlich sind. Sie liegt aber auch vor in einfallenden Schichten (Vorkommen 62 aus der Grabenstruktur sowie einzelne Ergebnisse von BRIDEN (pers.Mittl.)). Ein Faltentest der N- Komponente am hier vorliegenden Material ist nicht möglich.

Für die Tatsache der in situ Gruppierung können folgende Erklärungen angeführt werden:

- Das Einfallen der Schichten ist primär. Eine primäre, rein horizontale Ablagerung von Ignimbriten und Laven ist nicht wahrscheinlich. Die gemessene Remanenz ist eine primäre TRM.

Dies mag in gewissen Umfang zutreffen, kann jedoch nicht die heute nach innen ins Zentrum der Caldera weisende Neigung erklären.

- Verkippungen und Subsidenz haben sich bei Temperaturen noch über dem Curiepunkt ereignet. Die gemessene N- Komponente ist eine primäre TRM.

Dies ist auch vom geologischen Standpunkt denkbar (ALMOND, pers.Mittl., 1985).

- Die Komponente ist erst nach der Verkippung entstanden, bei Temperaturen unterhalb des Curiepunkts; die Remanenz ist im strengen Sinne nicht primär. Da die Subsidenz und Verkippung synchron zur Bildung des Komplexes verlaufen sind, kann auch hier eine syngenetische Remanenz angenommen werden.

5.2.5 Nabati

Geologie

Nabati ist ein anorogener Intrusivkomplex (BARTH u. MEINHOLD, 1979) am 5.Katarakt des Nils nördlich von Berber (Abb. 8, 9 und NAB-1). BARTH und MEINHOLD (op.cit.) beschreiben die Struktur folgendermaßen: Außer wenigen Radialgängen fehlt eine subvulkanische bis vulkanische Dachstruktur; ein tiefes Erosionsniveau ist aufgeschlossen. Der Komplex besitzt keine deutliche Ringstruktur, sondern ist ein in etwa runder Batholith von ca. 10 km Durchmesser. Typisch für den Komplex ist, daß sowohl eine hybrid-syntektische Dachfazies als auch eine Randfazies vorhanden sind. Die Alkaligranite und syntektischen Biotitgranite sind durchsetzt von migmatisierten und hybridisierten Basementgesteinen. Assoziiert sind tangentielle und radiale, rhyolitische und granitische Gänge.

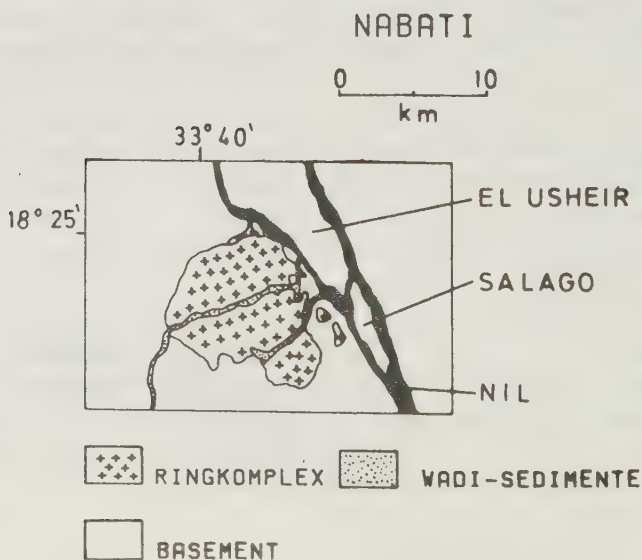


Abb. NAB 1: Geologische Übersichtsskizze von Nabati Ringkomplex

Eine Gesamtgesteinsaltersbestimmung (Rb/Sr) an 2 Granitproben liefert ein Alter der Intrusion von 573 ± 70 Ma. (BARTH et al., 1983). Zusätzlich wurde ein Mineralalter an Biotit gemessen. Mit den Gesamtgesteinsdaten in einer Isochrone zusammengefaßt erhalten BARTH et al. (op.cit.) 578 ± 9 Ma. Die niedrigen Anfangsverhältnisse von Rb/Sr und Übereinstimmung von Gesamtgesteins- und Mineralalter interpretieren BARTH et al. (op.cit) als Hinweis, daß die Gesteine nicht postintrusiv thermisch überprägt wurden. K/Ar-Mineralalter an Proben der Paläomagnetik-Kollektion befinden sich in Vorbereitung (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, pers. Mittl., 1986).

Der Komplex wurde an 10 Lokalitäten, verteilt um den zentralen Jebel Nabati, beprobt.

Messungen

Der geringe Erzgehalt saurer Gesteine zeigt sich in der Intensitätsverteilung der NRM (Abb. NAB-3). Die NRM-Intensitäten weisen eine breite Streuung über 5 Dekaden mit Maximalwerten bis 10 A/m auf. Nicht vollständig vermessen werden konnten die Proben des Vorkommens 55 aufgrund einer sehr schwachen Magnetisierung meist unter $0.5 \cdot 10^{-2}$ A/m.

Die NRM-Richtungen innerhalb wie zwischen den Vorkommen zeigen starke Dispersion. Die Präzisionsparameter k sind klein (Tab. NAB I und Abb. NAB-6).

Wechselfeldentmagnetisierung bis Feldstärken von ca. 10 mT beseitigt viskose Komponenten der Magnetisierung. Übrig bleibt eine einkomponentige, gut definierte, bis über 40 mT stabile Komponente der Remanenz. Thermische Entmagnetisierungsexperimente zeigen ein kontinuierliches Blockungstemperaturspektrum mit Maximalwerten über 600°C . Dazu siehe Abbildung NAB-2.

Die "Reinigung" der NRM mit Wechselfeldstärke von 8 bis 38 mT führt bei 6 Vorkommen zu einer guten Gruppierung der Richtungen. Die Streuung innerhalb der Vorkommen nimmt ab und als Mittel der Vorkommenmittelwerte wird eine CARM-Richtung von $\text{Dekl}=338^{\circ}$ und $\text{Inkl}=36.5^{\circ}$ mit $\alpha_{95}=18.0^{\circ}$ erhalten (Tab. NAB I). Alle 6 Vorkommen sind normal magnetisiert. Die zugehörige Polposition ist 67.9°N , 314.1°E . Die Vorkommenmittel sowie das Gesamtmittel sind in Ab-

bildung NAB-7 im Schmidt'schen Netz projiziert.

3 Vorkommen, die mit den stärksten NRM-Intensitäten, waren behaftet mit einer stark viskosen Magnetisierungs-komponente, die beim Abmagnetisierungsprozeß immer mehr in den Vordergrund trat und die Streuung vergrößerte. Eine Mittelung war hier nicht sinnvoll.

Als Träger der Magnetisierung wird in den $M_s(T)$ -Kurven Magnetit identifiziert (Abb. NAB-4). Die reversiblen Kurven mit Curietemperaturen um 560°C deuten auf stabilen, stöchiometrischen Magnetit. Dies wird bestätigt durch die $\text{IRM}(B)$ -Erwerbskurven, deren Sättigung bei 0.3 T fast erreicht ist (Abb. NAB-5). Sehr schwacher Anstieg der $\text{IRM}(B)$ -Kurven über 0.3 T und die bei thermischer Behandlung nachgewiesenen, hohen Blockungstemperaturen weisen auf Hämatit als weiteren Magnetisierungsträger hin.

Im Anschliff erkennt man deutliche Anzeichen von Martitisierung, der Verdrängung des Magnetits durch Hämatit in verschiedenen Umfang und Formen: Das Spektrum reicht von gar nicht bis wenig angegriffenem Magnetit bis zur fast vollständigen Umwandlung des Magnetits. Die Martitisierung ist meist flächig von Korngrenzen ausgehend und entlang Brüchen fortgeschritten, aber auch in Lamellen entlang der (111) -Richtung ausgebildet.

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

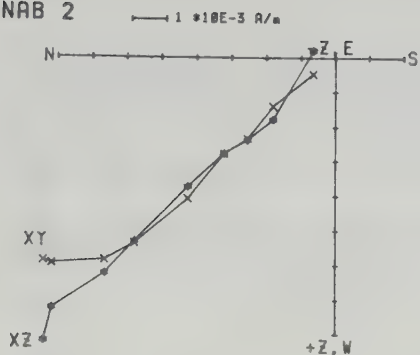
Abb. NAB 2: Wechselfeld- (rechts) und thermische (links) Entmagnetisierung des Kerns 59-1, dargestellt anhand von Zijderveld-Diagrammen und Abmagnetisierungskurven. Beachte, daß neben der Projektion in die xy -Ebene einmal die Darstellung in der yz -Ebene erfolgt (Wechselfeld-Behandlung) zum anderen in der xz -Ebene (thermische Behandlung).

Abb. NAB 3: Histogramm der NRM-Intensitäten (halblogarithmischer Maßstab). 170 Proben wurden bearbeitet.

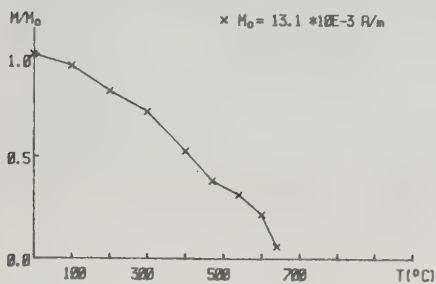
Abb. NAB 4: $M_s(T)$ -Kurve für den Kern 50-4. Die Curietemperatur von knapp 600°C weist auf Magnetit als Magnetisierungsträger.

Abb. NAB 5: Beispiel zweier IRM -Erwerbskurven und zugehöriger Koerzitivkraftspektren. Die Proben 50-6-1 (links) und 59-6-1 (rechts) zeigen fast vollständige Sättigung bei Feldstärken von 0.3 Tesla .

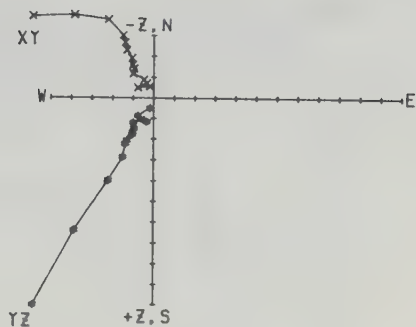
NAB 2



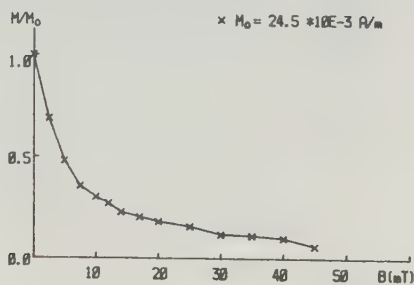
59- 1-3 CC



→ 2 $\times 10^{-3}$ A/m



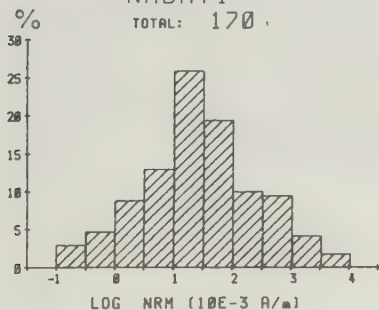
59- 1-2 CC



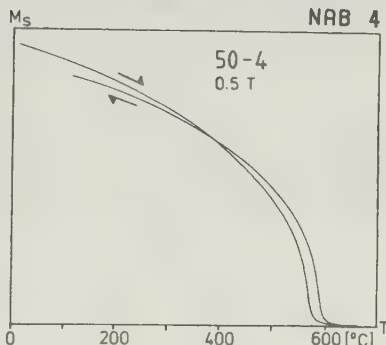
NAB 3

NABATI

TOTAL: 170



NAB 4

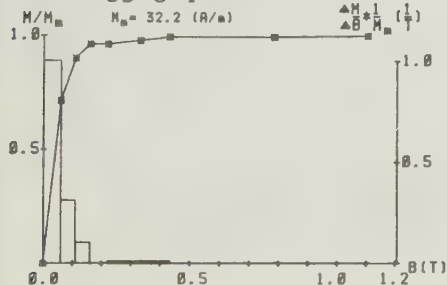


NAB 5 50-6-1

$M_m = 32.2$ (A/m)

$\Delta M = 1$ ($\frac{1}{M_m}$)

$\Delta B = 1$ ($\frac{1}{M_m}$)



59-6-1

$M_m = 23.7$ (A/m)

$\Delta M = 1$ ($\frac{1}{M_m}$)

$\Delta B = 1$ ($\frac{1}{M_m}$)

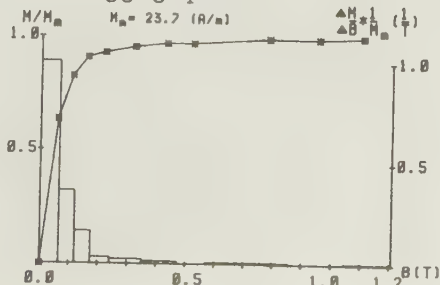


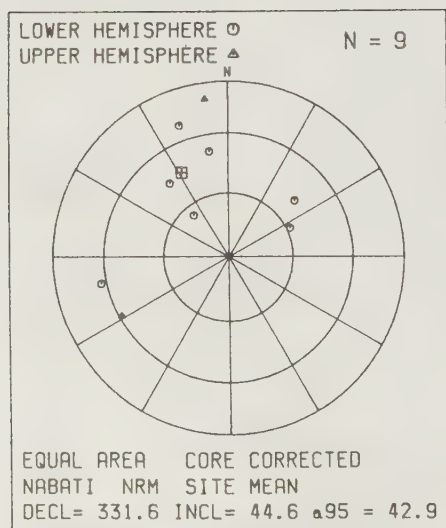
TABELLE NAB I

Paläomagnetische Ergebnisse von NABATI RING KOMPLEX (18.18°N, 33.70°E)
-Vorkommenmittel-

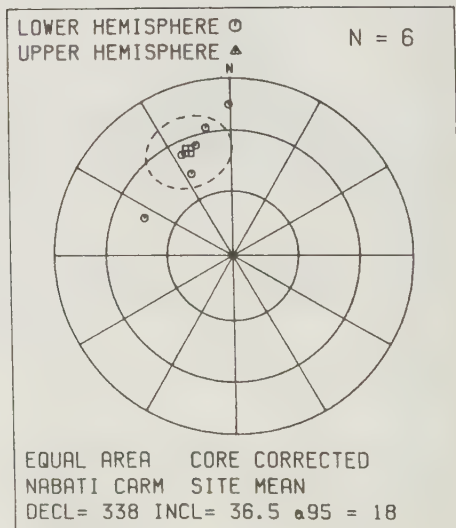
Vork Nr	MRM N	D	I	k	AF(mT)	CARM N	D	I	k	α_{95}	UGP (°N)	(°E)
50	10	49.6	48.9	4.8	15-30	18	359.4	15.9	11.6	14.8	79.7	217.2
51	21	340.0	21.5	23.1	10	18	349.0	27.4	105.4	3.4	78.8	285.0
52	16	241.2	-31.4	7.6			starke Streuung					
53	19	64.7	58.1	1.7	8-15	18	334.4	47.5	3.4	20.0	64.5	332.0
54	18	321.2	64.9	2.9			starke Streuung					
55	zu schwache Magnetisierung											
56	20	258.0	27.2	2.3	10-35	19	293.8	45.7	7.1	13.6	29.0	325.1
57	19	350.3	38.0	10.8	10-30	19	342.5	35.1	25.9	6.7	73.4	310.0
58	19	351.9	-10.2	3.6			starke Streuung					
59	16	322.1	45.9	35.1	12	16	334.2	37.0	32.2	6.6	65.6	313.2
Mittel der Vorkommenmittel: (alle normal)						6	338.0	36.5	14.5	18.0	67.9	314.1
												K=13.6
												A95=18.8

N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, K,k=Präzisionsparameter,
A95, α_{95} =Konfidenzwinkel; alle Winkelangaben in Grad

NAB 6



NAB 7



Daneben ist primärer Ilmenit, Titanit (pseudomorph nach Ilmenit) und Zirkon vorhanden. Der Erzgehalt ist gering, die Erzgröße liegt zwischen 20 und 200µm.

An zwei Vorkommen (57 und 59) wurde die Anisotropie der Suszeptibilität vermessen. Der Grad der Anisotropie wird ausgedrückt durch den P-Faktor (Verhältnis von größter zu kleinster Suszeptibilität) und ist mit Werten zwischen 1.03 und 1.10 deutlich ausgeprägt. Eine störende Ablenkung der TRM durch die magnetische Anisotropie ist bei diesen Werten nicht zu erwarten (HROUDA, 1982).

Den Prozeß der Martitisierung faßt RAMDOHR (1960) in vielen Fällen als Nachhall der erzbildenden Tätigkeit bei sinkenden Temperaturen auf. Zur Martitisierung kann es aber auch besonders in ariden Klimaten durch beginnende Verwitterung kommen.

Hämatit und Magnetit sind Träger ein und derselben Magnetisierungs-komponente. Über 90 Prozent der remanenten Magnetisierung stammen von primärem Magnetit. Wie oben ausgeführt, schließen BARTH et al. (op.cit.) eine spätere thermische Überprägung aus. Die erhaltene Remanenz wird demnach als primär angesehen.

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Tab. NAB I: Paläomagnetik Meßergebnisse von Nabati Ringkomplex.

Abb. NAB 6 und NAB 7: Projektion der NRM-Vorkommenmittel (NAB 6) und der CARM-Vorkommenmittel (NAB 7) im Schmidt'schen Netz. Das jeweilige Gesamtmittel (Kreuz mit Quadrat) und Konfidenzkreis (nur in Abb.NAB 7) ist angegeben.

TABELLE SAF I

Paläomagnetik Ergebnisse von BIR SAFSAF (23.10°N, 29.33°E)
-Handstückmittel-

HS Nr	NRM N	D	I	k	AF(mT)	CARM N	D	I	k	α_{95}	UGP (°N)	(°E)
801	8	32.0	61.6	99.5	20	5	30.9	55.9	93.1	8.0	60.2	85.5
802	8	332.2	4.7	33.3	20	5	347.6	18.9	21.0	17.1	72.1	252.0
803	8	6.1	16.6	65.4	40-50	4	176.6	-31.8	19.3	21.4	83.3	230.4
804	11	205.4	30.5	84.5	60-90	5	201.9	17.8	18.5	18.2	51.3	173.3
805	11	358.9	-10.5	1.2	25	9	164.6	-26.6	16.8	12.9	72.0	270.2
806	13	158.1	-10.4	207.5	26	7	158.3	-21.7	17.9	14.6	66.1	273.1
811	11	223.4	-37.0	22.6	20	5	326.9	35.0	47.5	11.1	59.9	298.6
812	6	336.0	5.0	276.1	20	5	336.0	8.5	210.0	5.3	60.1	263.8
813	6	343.4	16.0	103.4	20	3	323.7	29.6	40.4	19.7	55.1	293.9
814	9	285.8	27.6	340.0	30-60	9	37.0	6.6	7.5	20.1	48.4	142.0
821	5	336.4	36.2	15.0	20	4	328.0	36.6	119.5	8.4	60.1	300.3
822	3	30.9	27.1	106.0	20-23	3	33.5	28.4	126.4	11.0	57.4	127.4
823	8	146.9	-10.4	281.6	25-35	6	172.9	-35.1	77.3	7.7	82.3	270.7
824	7	210.6	-37.4	102.8	20	5	190.2	-41.5	79.1	8.7	73.2	112.9
831	10	140.0	29.9	300.5	20-30	5	169.7	-0.3	47.3	11.2	64.9	234.9
832	13	75.0	1.9	210.0	20	5	169.5	-32.9	193.9	5.5	78.9	273.5
833	8	320.1	57.1	12.0	20-23	5	158.3	-49.2	130.4	6.7	69.4	323.9
834	5	17.0	20.4	351.0	20	3	351.2	27.9	345.0	4.6	78.2	256.0
841	9	310.5	-22.4	289.0		starke Streuung						
842	4	343.2	31.7	35.4	20-23	4	163.3	-33.4	46.5	19.6	73.6	285.1
843	7	290.7	-14.4	2.6		starke Streuung						
844	nicht bearbeitbar											
845	3	340.9	43.5	53.2	20-23	3	353.4	48.0	546.0	4.1	81.6	345.8
851	7	109.6	-30.8	153.9	20-30	5	156.6	-16.5	46.7	11.3	63.2	269.9
861	12	136.2	-5.0	10.3	30-40	6	170.6	-45.4	11.0	20.3	80.7	325.4
862	4	198.6	55.5	126.0	50-90	3	215.8	30.7	60.1	16.0	49.7	198.3
Mittel der Handstückmittel: (10 normal, 13 invers)						23	353.2	27.3	8.7	10.9	80.0	249.7
											K=11.8	
											A95= 9.2	
Mittel aller Proben: (55 normal, 63 invers)						118	353.3	27.4	7.6	5.0	79.3	246.9
Mittel aller Gangmittel:						7	353.7	26.0	23.9	12.6	78.8	242.0

N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, K,k=Präzisionsparameter,
A95, α_{95} =Konfidenzwinkel; alle Winkelangaben in Grad

5.2.4 Bir Safsaf

Geologie

Grundgebirge ist in SW-Ägypten und dem angrenzenden Sudan in 5 Gebieten aufgeschlossen. Eines davon ist die relativ flache Ebene nördlich der Wasserstelle Bir Safsaf (Abbildungen 8 u. 10 sowie BAL-1). Dort stehen Gneise, Migmatite und Granite an. Eine erste Skizzierung der Geologie des Gebiets geben SCHANDELMEIER et al. (1983).

Beprobt wurden für die Paläomagnetik und radiometrische Altersbestimmung Granodiorit-Porphyr-Gänge an 2 Lokationen A und B (Abb. BAL-1). Die K/Ar-Altersbestimmungen von Lokation B liefern ein Gesamtgesteins-Minimalalter von 502 Ma (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, 1985) und ein Biotit-Mineralalter von ca. 580 Ma (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, pers.Mittl., 1986). Diese Alter konnten mittlerweile an Proben von Lokation A vorläufig qualitativ bestätigt werden (SCHANDELMEIER, pers.Mittl.).

An Lokation A wurden von 7 Gängen 26 orientierte Handstücke für eine paläomagnetische Untersuchung gesammelt. Die parallelen, in etwa von Nord nach Süd streichenden Gänge sind in E-W Richtung über eine Distanz von ca. 3 km aufgeschlossen. Ein Handstück konnte wegen Transportschadens nicht berücksichtigt werden.

Messungen

Die NRM-Intensitäten liegen zwischen $30 \cdot 10^{-3}$ und $10\,000 \cdot 10^{-3}$ A/m mit einem Maximum bei $200 \cdot 10^{-3}$ bis $2\,000 \cdot 10^{-3}$ A/m (Abb. SAF-1).

Die Handstückmittelwerte zeigen eine starke Streuung (Tab. SAF I u. Abb. SAF-9). Das Vorhandensein einer inversen Richtungskomponente ist angedeutet.

Entmagnetisierungsexperimente (Abb. SAF-6 bis 8) weisen auf eine große, relativ weiche Komponente der Remanenz mit einem MDF um 5 mT hin. Ca. 10 Prozent der Anfangsintensität macht eine höherkoerzitive Phase aus, die bis über 90 mT stabil bleibt. Das kontinuierliche Blockungstemperatur-Spektrum reicht bis über 650°C hinaus. Das Richtungsverhalten ist zum Teil einkomponentig, zum Teil tritt eine viskose, sekundäre Remanenz auf und bei Hand-

stück 805 setzt sich die normale NRM-Richtung aus paralleler und antiparalleler Komponente zusammen.

Eine Auswahl der Proben aller Handstücke wurde im Wechselfeld behandelt. Gut gruppierte Handstück-Mittelwerte ergeben ein mit $Dekl=353.2^\circ$, $Inkl=27.3^\circ$ und $\alpha_{95}=10.9^\circ$ definiertes Mittel über 23 Handstücke (Tab. SAF I u. Abb. SAF-10). Die Mittelung über alle Proben bzw. über die 7 Gänge liefert keine signifikant verschiedenen Resultate. 12 Handstücke zeigen nach Entmagnetisierung inverse Richtungen, Handstück 805 weist sowohl inverse wie normale Richtungen auf. Bei 2 Handstücken (841, 843) können die vorliegenden, annähernd antiparallelen Komponenten nicht getrennt werden. Die gemessenen intermediären Richtungen erlauben keine Mittelung.

$M_s(T)$ -Kurven mit Curietemperaturen um $560^\circ C$ (Abb. SAF-3 und 5), IRM(B)-Erwerb (SAF-2 und 4) und Gitterkonstantenbestimmung (Abb.15 u. Tab.VIII) weisen auf Magnetit als Träger der Magnetisierung hin. Der durch hohe Blockungstemperaturen und hohe Koerzitivkräfte bei den Entmagnetisierungsversuchen identifizierte Hämatit als Remanenzträger bleibt hier unentdeckt.

Wie die Erzmikroskopie zeigt, ist der Hämatit durch Martitisierung aus Magnetit hervorgegangen. Dieser Verdrängungsprozeß ist in verschiedenem Umfang - wenig angegriffene Magnetitkörner wechseln mit fast vollständig verdrängten - und verschiedener Form, flächig und in Lamellen, wirksam gewesen (Abb. SAF-11).

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb. SAF 1: NRM-Intensitätsverteilung für die Proben von Bir Safsaf. 186 Proben wurden bearbeitet.

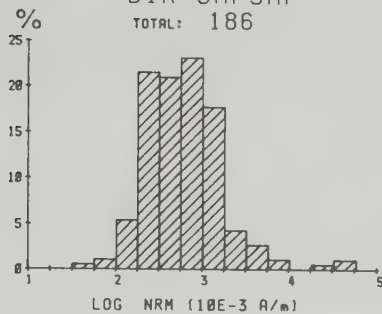
Abb. SAF 2 und SAF 4: IRM-Erwerb und Koerzitivkraftspektrum der Proben 801-3-1 u. 832-1-1. Sättigung ist bei 0.2 bis 0.3 Tesla erreicht. Thermomagnetische Kurven an Material derselben Proben sind in Abb. SAF 3 und SAF 5 dargestellt.

Abb. SAF 3 und SAF 5: $M_s(T)$ -Kurven der Proben 801-3-1 und 832-1-1 mit Curiepunkt von Magnetit bei ca. $570^\circ C$.

SAF 1

BIR SAFSAF

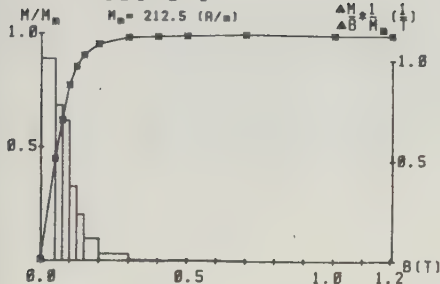
TOTAL: 186



SAF 2

801-3-1

$M_m = 212.5$ (A/m)

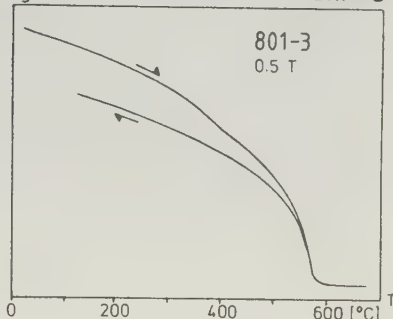


M_s

SAF 3

801-3

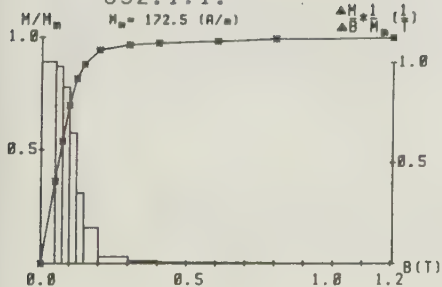
0.5 T



SAF 4

832.1.1.

$M_m = 172.5$ (A/m)

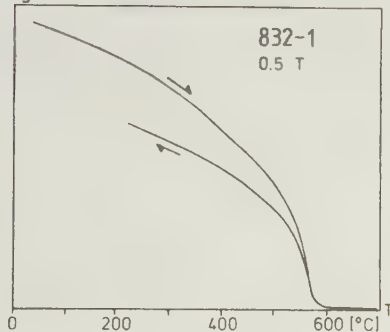


M_s

SAF 5

832-1

0.5 T



Akzessorisch sind Sulfid, Titanit und Spinell vorhanden. Die Korngröße der Erze schwankt zwischen 10 μm und 100 μm mit maximaler Häufigkeit um 40 μm .

Die Martitisierung ist, wie hier durch das überwiegende Auftreten des Hämatits in deutlichen und durchgehenden Lamellen dokumentiert, bei der Abkühlung gleich nach der Platznahme des Gesteins vorsichgegangen. Die erhaltene Remanenz wird von Magnetit und Hämatit getragen. Beide Minerale sind primäre Bildungen und tragen bei ausreichender Stabilität eine Remanenz, die zusammen mit der Platznahme und Abkühlung des Gesteins entstanden ist.

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb. SAF 6 bis 8: Wechselfeld (rechts) und thermische (links) Entmagnetisierungsexperimente an den Proben 805-5-1 (SAF 6) bzw. 811-1-2 (SAF 7) sowie dem Kern 823-5 (SAF 8) dargestellt anhand von Zijderveld-Diagrammen und Abmagnetisierungskurven. Beachte, daß in Abb. SAF 7 die Projektion in die xy- und yz-Ebene erfolgt, in Abb. SAF 8 in die xy- und xz-Ebene.

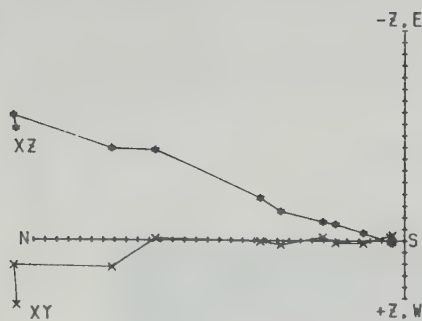
Bilderklärung für die folgende Seite:

Abb. SAF 9 und SAF 10: Projektion der NRM- (SAF 9) und CARM- (SAF 10) Vorkommenmittel im Schmidt'schen Netz (Werte aus TAB SAF I). Das jeweilige Gesamtmittel (Kreuz mit Quadrat) und Konfidenzkreis ist angegeben.

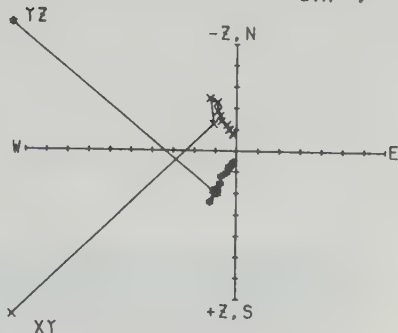
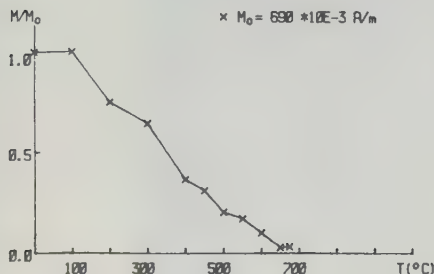
SHF 6

 $\rightarrow 2 \cdot 10E-2 \text{ A/m}$ $\rightarrow 1 \cdot 10E-2 \text{ A/m}$

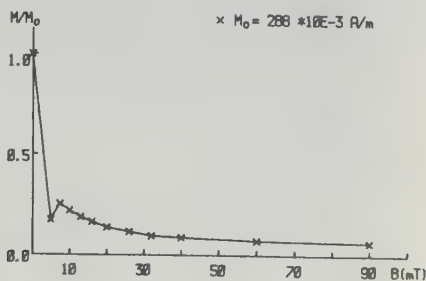
SAF 7



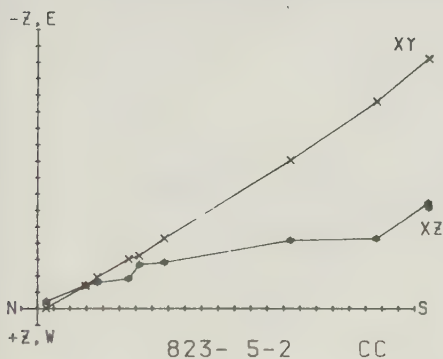
805- 5-1 CC



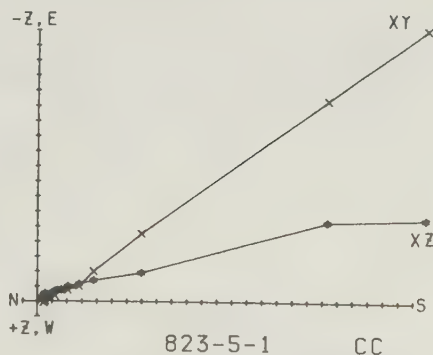
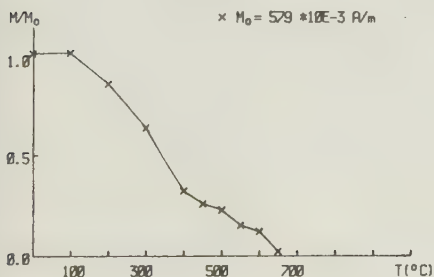
811- 1-2 CC



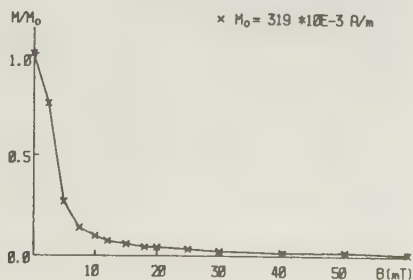
SAF 8

 $\rightarrow 2 \cdot 10E-2 \text{ A/m}$ $\rightarrow 1 \cdot 10E-2 \text{ A/m}$ 

823- 5-2 CC

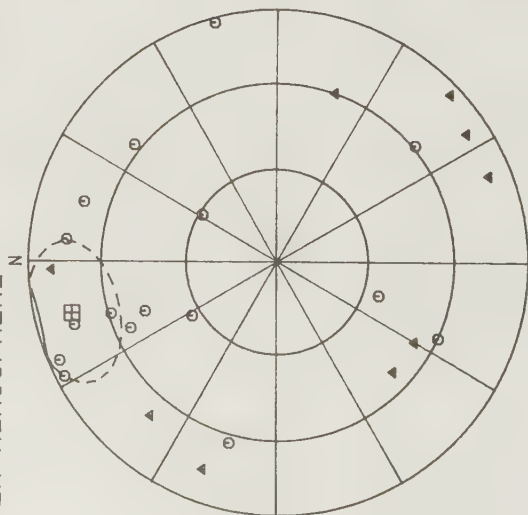


823-5-1 CC



LOWER HEMISPHERE ○
UPPER HEMISPHERE ▲

N = 25

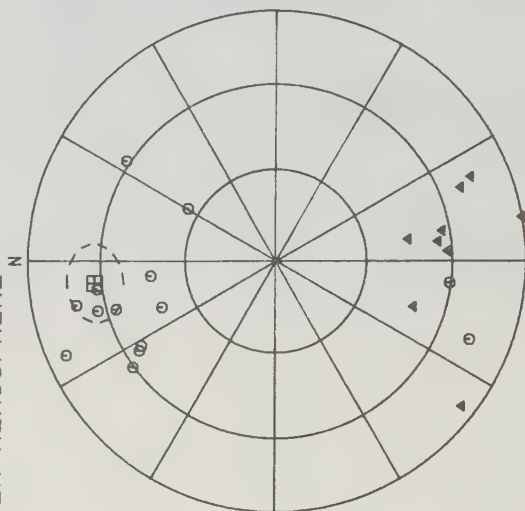


EQUAL AREA CORE CORRECTED
BIR SAFSAF NRM HANDPIECES
DECL= 346.1 INCL= 16.2 α_{95} = 18.5

SAF 9

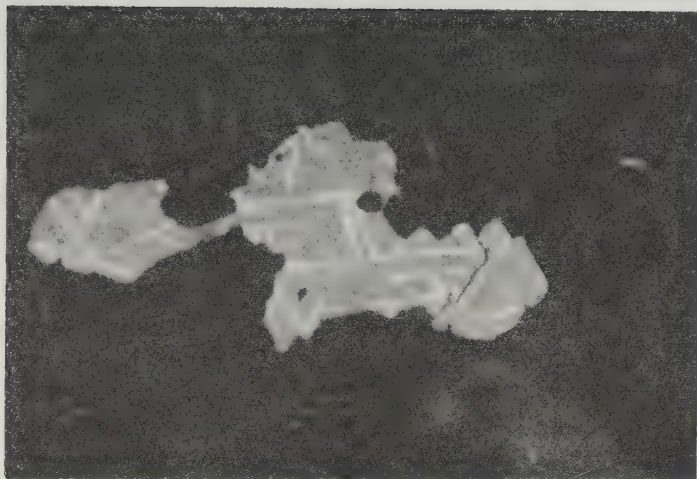
LOWER HEMISPHERE ○
UPPER HEMISPHERE ▲

N = 23



EQUAL AREA CORE CORRECTED
BIR SAFSAF HANDSAMPLES
DECL= 353.2 INCL= 27.3 α_{95} = 10.9

SAF 10



SAF.11: Anschliff: 801-3-1

Lokalität: Bir Safsaf

Maßstab: 50µm

Nicols: parallel

Bem.: martitisiertes Erzkorn aus
Magnetit mit Hämatit-Lamellen

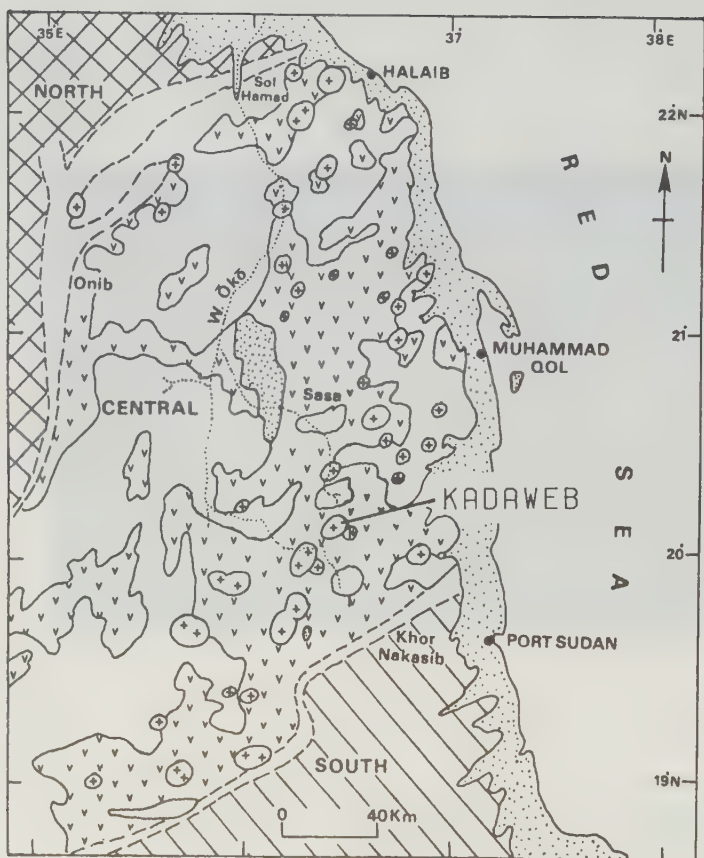


Abb. KAD 1: Geologische Übersichtskarte der Umgebung des Kadaweb Ringkomplexes (verändert nach VAIL et al., 1984). Die Lage des Kadaweb Komplex ist eingezeichnet.

5.2.6 Kadaweb

Geologie

Der plutonische Komplex bei Bir Kadaweb in den Red Sea Hills ist eine postorogene Intrusion von elliptischer Form (VAIL et al., 1984; SUDAN SURVEY DEP., 1982) (siehe Abbildungen 8 u. 11 sowie KAD-1). Der Komplex intrudierte in die vulkanosedimentären Schichten des Basements und ist von bimodaler Zusammensetzung, d.h. einer früheren, gabbroiden Einheit folgen jüngere Granite.

Die gabbroiden Gesteine sind stark uralitisiert, die Pyroxene sind zu Hornblenden umgewandelt. Diese Alteration kann als spätmagmatisch angesehen werden oder sie ist durch die später intrudierten Granite hervorgerufen worden. Darüber hinaus sind Anzeichen einer regionalen, niedriggradigen Grünschiefer-Metamorphose vorhanden (VAIL et al., op.cit.). Granite und Mikrogranite sind zum Teil bogenförmig aufgeschlossen. Mikrogranite stehen in gangähnlichen Decken am Rande des Komplex an; sie intrudierten wahrscheinlich verbunden mit Cauldron-Subsidenz als Ringgänge.

Von einer Reihe von Gesteinsproben des Kadaweb Komplexes liegen Rb/Sr-Altersbestimmungen vor (KLEMENIC, 1983). Die Granite ergeben ein Rb/Sr-Gesamtgesteinsalter von 717 ± 7 Ma. Die Alter der Gabbros und der Mikrogranite bleiben wegen großer Meßfehler weiterhin unsicher. Werden jedoch die Isochronen von Gabbros und Graniten zu einer einzigen Isochrone zusammengefaßt, so erhält man ein Alter von 719 ± 6 Ma (14-Punkte Isochrone). VAIL et al. (op.cit.) interpretieren diese so errechneten Alter als Intrusionsalter.

Heftige Regenfälle - die ersten seit 5 Jahren nach Schilderung dort lebender Nomaden - und daraus resultierende Schwierigkeiten mit Piste und Fahrzeugen verhinderten eine umfassendere Beprobung. Von der gabbroiden Einheit konnten an 2 Vorkommen 16 unabhängig orientierte Kerne, die insgesamt 35 Proben ergaben, gesammelt werden. Die 2 Vorkommen liegen ca. 1 km nördlich von Bir Kadaweb in ca. 1 km Abstand voneinander.

TABELLE KAD 1

Paläomagnetik Ergebnisse von KADAWEB GABBRO (20.08°N, 36.33°E)

-Vorkommennittel-

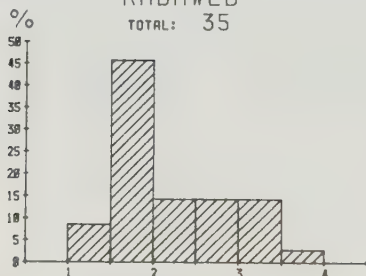
Vork Nr	NRM				AF(mT)		CARM				UGP		
	N	D	I	k			N	D	I	k	α_{95}	(°N)	(°E)
168	16	98.5	-19.8	7.6	20		16	98.2	-19.6	24.4	7.6	3.5	315.9
169	19	41.7	-34.9	3.9	20		19	82.5	-28.8	89.8	3.6	-1.5	323.4
Mittel der Vorkommennittel:							2	86.5	-24.2	(98.9	25.4)	1.0	319.6
(K=161.1													
A95= 19.8)													

N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, K,k=Präzisionsparameter,
A95, α_{95} =Konfidenzwinkel; alle Winkelangaben in Grad

KAD 2

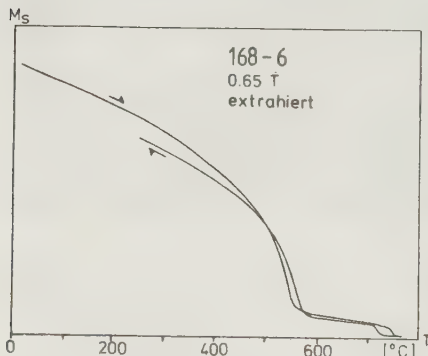
KADAWEB

TOTAL: 35

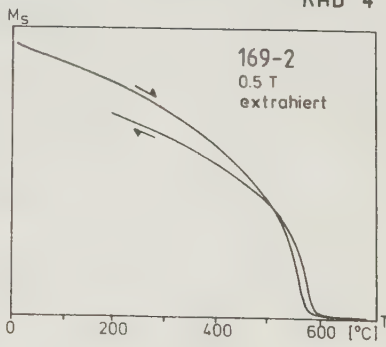


KAD 3

LOG NRM (10E-3 A/m)

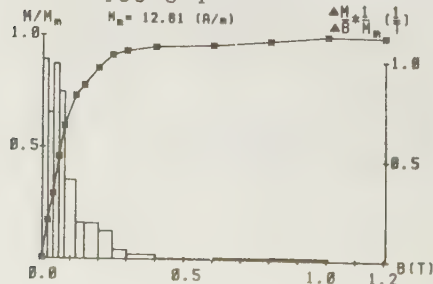


KAD 4

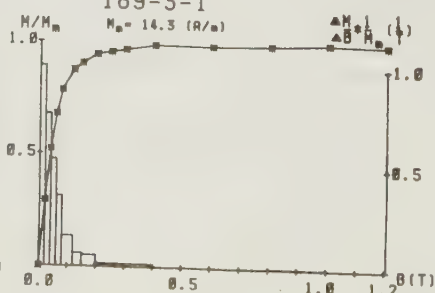


KAD 5

168-8-1

 $M_s = 12.81$ (A/m)

169-3-1

 $M_s = 14.3$ (A/m)

KAD 6

Messungen

Das Histogramm der NRM-Intensitäten zeigt gut meßbare, zwischen $10 \cdot 10^{-3}$ A/m und $10\ 000 \cdot 10^{-3}$ A/m liegende Werte (Abb. KAD-2). Die Richtungen der unbehandelten NRM, im Schmidt'schen Netz projiziert (Abb. KAD-9 u. 10), zeigen eine Großkreisverteilung. Dies deutet daraufhin, daß eine primäre Komponente der Magnetisierung noch von einer weiteren in verschiedenem Umfang überlagert wird. Die mittleren NRM-Richtungen der beiden Vorkommen sind gleichwohl hinreichend definiert (Tab. KAD I) und weichen signifikant von dem heutigen Erdfeld ab.

Eine zweite, weniger stabile Richtungskomponente tritt in verschiedenem Maße und nicht bei allen Proben auf: 168-6-2 (Abb. KAD-7) zeigt rein einkomponentiges Entmagnetisierungsverhalten bis auf eine sehr kleine VRM, die bereits bei 200°C abgebaut ist. Ausgeprägt erscheint die zweite Komponente im Kern 168-8 (Abb. KAD-8). Wechselfelder von 20 mT und Temperaturen von bis zu 500°C führen zu ihrem Abbau.

Als optimale Behandlung aller Proben wurden Spitzenfeldstärken von 20 mT gewählt. Als stabile Endrichtung konnte bei allen Proben eine östliche, nach oben weisende Komponente erhalten werden. Sie ist bis zu Temperaturen von 650°C und Feldstärken von 90 mT stabil. Die Streuung der Richtungen innerhalb und zwischen den Vorkommen nimmt stark ab (Tab. KAD I und Abb. KAD-11 u. 12). Alle Proben sind normal magnetisiert. Als mittlere Richtung erhält man $\text{Dekl}=86.5^\circ$ und $\text{Inkl}=-24.2^\circ$, als zugehörige Polposition

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

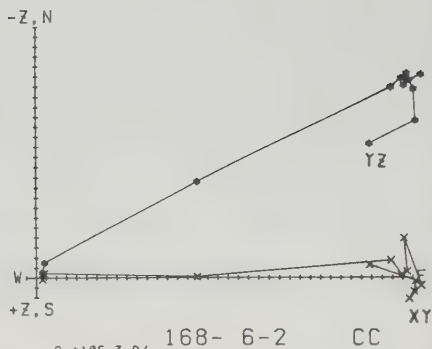
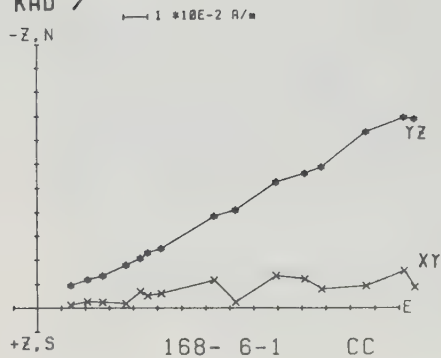
Tab. KAD I: Paläomagnetik Meßergebnisse des Kadaweb-Komplexes.
Dazu siehe auch die Abb. KAD 9 bis 12.

Abb. KAD 2: Häufigkeitsverteilung der NRM-Intensität (halblogarithmischer Maßstab). 35 Proben aus 16 Kernen wurden bearbeitet.

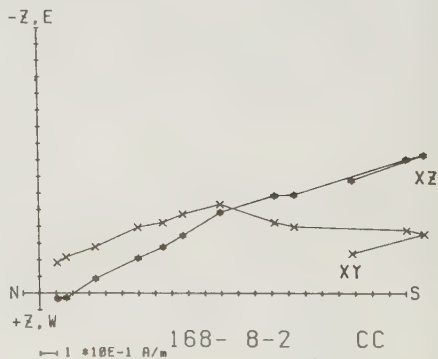
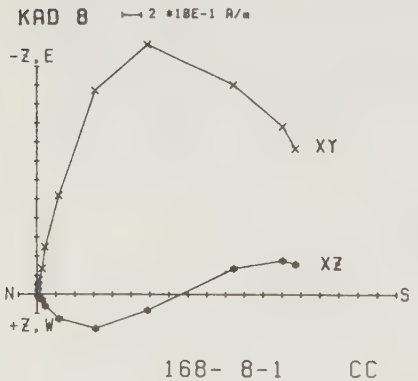
Abb. KAD 3 u. 4: $M_s(T)$ -Kurven für magnetisch extrahiertes Material der Kerne 168-6 und 169-2. Es können Magnetit und Hämatit (nur bei 168-6) anhand der Curiepunkte bei 560°C und 670°C nachgewiesen werden.

Abb. KAD 5 u. 6: IRM-Erwerbskurven und Koerzitivkraftspektren der Proben 168-8-1 und 169-3-1. Sättigung scheint bei 0.4 Tesla erreicht zu sein.

KAD 7



KAD 8



1.0°N und 319.6°E. Konfidenzwinkel und Präzisionsparameter für das Gesamtmittel können nur unter Vorbehalt angegeben werden, da die Fisherstatistik im strengen Sinne nur für Grundmengen größer oder gleich 3 angewendet werden darf.

Gesteinsmagnetische Untersuchungen weisen Magnetit und Hämatit als Magnetisierungsträger nach: Die $M_s(T)$ -Kurve (Abb. KAD-3) liefert Curietemperaturen von 670° und 560°C. Zusätzlich durch eine röntgenographische Untersuchung derselben Probe werden Hämatit und Magnetit anhand von Netzebenenabständen bzw. Gitterkonstante identifiziert. Hämatit kann schon von geringen Anteilen des viel stärker magnetischen Magnetit verdeckt werden. Dies wird in Abbildung KAD-4 anhand der $M_s(T)$ -Kurve für Probe 169-2-1 deutlich. Gleiches gilt für die $IRM(B)$ -Kurven (Abb. KAD-5 u. 6), die fast vollständige Sättigung bei 0.4 T erreichen. Für Felder $B \geq 0.4$ Tesla ergibt sich nur noch ein fast unmerklicher Anstieg der IRM . Hier sind die Entmagnetisierungsexperimente mit Blockungstemperaturen über 600°C und hochkoerzitives Verhalten bester Nachweis des Hämatitgehalts.

Die Erzmikroskopie zeigt einen geringen Gehalt an primärem Ilmenit, Sulfiden, Titanit, Magnetit und Hämatit mit Erzgrößen von 40-240 μm . Hämatit tritt in 3 Formen auf:

- in großen, inhomogen erscheinenden Körnern als Bildung einer intensiven Verwitterungs-Martitisierung
- und primär als Entmischung in Ilmenitkörnern
- sowie lamellenförmig in bei der Abkühlung martitisierten Magnetit.

Die Entmagnetisierungsexperimente zeigen, daß die erhaltene CARM sowohl von Hämatit wie Magnetit getragen wird. Magnetit allein scheint Träger einer kleinen, instabilen VRM und einer

Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb. KAD 7 und KAD 8: Zijdeveld-Diagramme und Abmagnetisierungskurven für thermische (rechts) und Wechselfeld- (links) Behandlung der Kerne 168-6 (KAD 7) und 168-8 (KAD 8). Der Verlauf der Suszeptibilität bei thermischer Behandlung ist angegeben. Beachte, daß in Abb. KAD 7 die Projektion in die xy- und yz-Ebene erfolgt, in Abb. KAD 8 in die xy- und xz-Ebene.

weiteren, sekundären und verschieden stark ausgeprägten Magnetisierungskomponente zu sein. Die gemessene CARM ist durch große Stabilität ausgezeichnet. Das bestimmte Alter des Komplexes muß als Maximalalter der Magnetisierung interpretiert werden. Ob die CARM im eigentlichen Sinne primär ist oder während der (bald ?) darauffolgenden Uralitisation und Grünschiefermetamorphose entstanden ist, muß weiterhin offenbleiben.

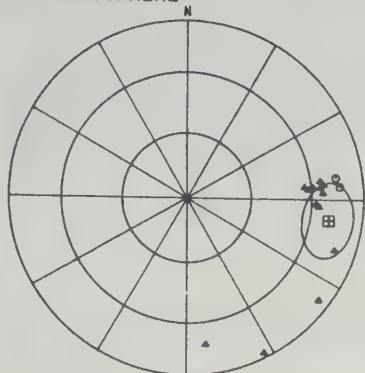
Bilderklärung für die gegenüberliegende Seite:

Abb. KAD 9 u. KAD 10: Projektion der NRM-Vektoren im Schmidt'schen Netz für die Vorkommen 168 (KAD 9) und 169 (KAD 10). Das jeweilige Gesamtmittel (Kreuz mit Quadrat) und Konfidenzkreis ist angegeben.

Abb. KAD 11 u. KAD 12: Projektion der CARM-Vektoren im Schmidt'schen Netz für die Vorkommen 168 (KAD 11) und 169 (KAD 12). Das jeweilige Gesamtmittel (Kreuz mit Quadrat) und Konfidenzkreis ist angegeben. Die Streuung der Richtungen wird durch die Wechselfeldbehandlung stark reduziert.

KAD 9

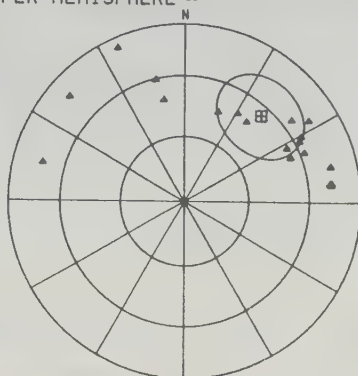
LOWER HEMISPHERE ○ N = 16
UPPER HEMISPHERE ▲



EQUAL AREA CORE CORRECTED
KADAWEB 168 NRM
DECL= 98.5 INCL=-19.8 α_{95} = 14.3

KAD 10

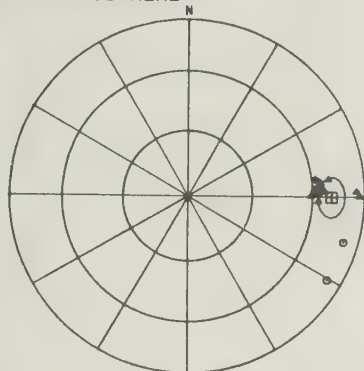
LOWER HEMISPHERE ○ N = 19
UPPER HEMISPHERE ▲



EQUAL AREA CORE CORRECTED
KADAWEB 169 NRM
DECL= 41.7 INCL=-34.9 α_{95} = 19.5

KAD 11

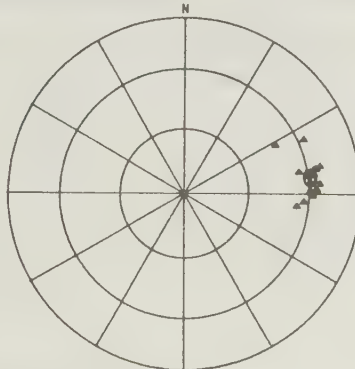
LOWER HEMISPHERE ○ N = 16
UPPER HEMISPHERE ▲



EQUAL AREA CORE CORRECTED
KADAWEB 168 CARM
DECL= 90.2 INCL=-19.6 α_{95} = 7.6

KAD 12

LOWER HEMISPHERE ○ N = 19
UPPER HEMISPHERE ▲



EQUAL AREA CORE CORRECTED
KADAWEB 169 CARM
DECL= 82.5 INCL=-28.8 α_{95} = 3.6

5.2.7 Weitere Ergebnisse:

Bei vielen der Lokalitäten konnten aus einer Reihe von Gründen keine sinnvollen Paläopole bestimmt werden. Die Lokalitäten werden hier kurz in der Reihenfolge aufgetretener Schwierigkeiten vorgestellt und die Gründe für den Abbruch der Bearbeitung erläutert:

Sileitat es Sufr

Beprobt wurden die Sileitat Granite der bei DELANY (1958) und AHMED (1977a) beschriebenen Intrusion 30 km nordöstlich von Khartum. Steinbrüche, zum Teil noch in Betrieb, ermöglichten hier eine einfache Beprobung. VAIL (1985) zitiert radiometrische Alter von 169 Ma (Rb/Sr, KLEMENIC, 1983) und 165 Ma (K/Ar, BROOK u. RUNDLE, 1974).

Die Magnetisierung der Granite liegt durchgehend unter der Meßgenauigkeit des Magnetometers. Der Anteil magnetischer Minerale ist zu gering, eine Bearbeitung war deshalb nicht möglich. Der Einsatz von Kryogenmagnetometern mit bis zu 100-fach größerer Meßempfindlichkeit dürfte jedoch in Zukunft neue Möglichkeiten eröffnen.

Musran

Der Musran-Ringkomplex in der Bayuda Wüste ist charakterisiert durch hauptsächlich alkaligranitisches Intrusiv- und alkali-rhyolitisches Extrusivmaterial. Eine nähere Beschreibung geben BARTH u. MEINHOLD (1979). Das Gesamtgesteinsalter ist mit der Rb/Sr-Methode auf 396 ± 3 Ma bestimmt (BARTH et al., 1983).

9 Vorkommen wurden beprobt, davon waren bei 5 bereits die NRM-Intensitäten zu schwach für eine Vermessung. Von den verbliebenen 4 Vorkommen hatte nur Vorkommen 11 eine zur Entmagnetisierung ausreichende Intensität (Tab. MUS I u. Abb. MUS-1).

Die erhaltene mittlere Richtung soll wegen der ungenügenden Datenbasis nicht interpretiert werden.

TABELLE MUS I

Paläomagnetik Ergebnisse von MUSRAN KOMPLEX (18.15°N, 32.73°E)

-Vorkommennittel-

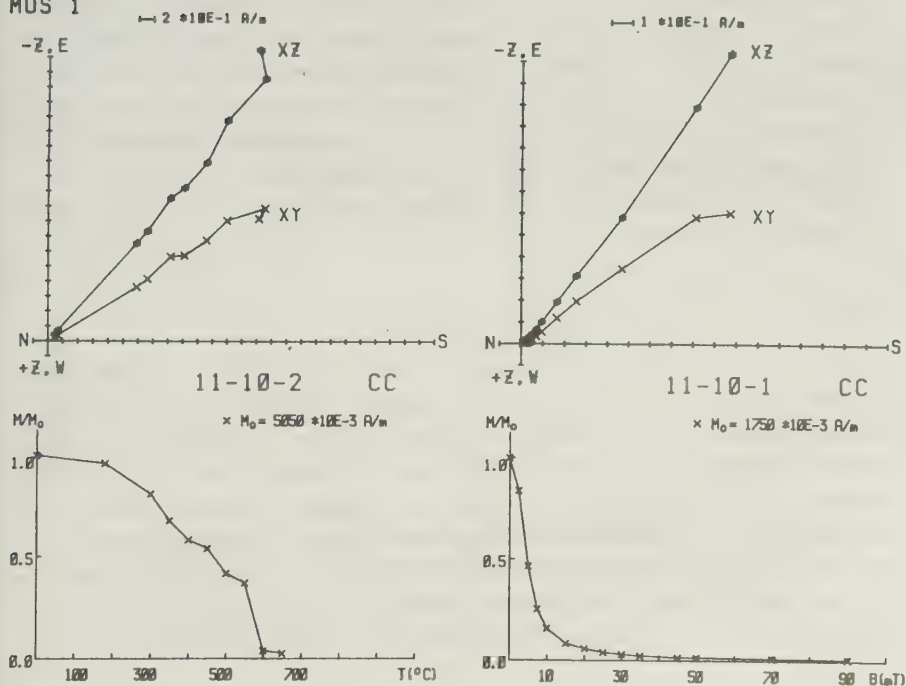
Vork. Nr	NRM				AF(mT)				CARM				UGP	
	N	D	I	k	N	D	I	k	N	D	I	k	$\alpha 95$	(°N) (°E)
11	17	153.4	6.0	3.2	30-40	15	155.0	-20.0	14.4	10.4	65.2	287.0		
12					zu schwache Magnetisierung									
13					"	"	"	"	"	"	"	"		
14					"	"	"	"	"	"	"	"		
15	12	337.2	6.3	4.8	"	"	"	"	"	"	"	"		
16					"	"	"	"	"	"	"	"		
17	20	18.4	9.9	2.9	"	"	"	"	"	"	"	"		
18					"	"	"	"	"	"	"	"		
19	16	154.0	-13.5	2.9	"	"	"	"	"	"	"	"		

N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, k=Präzisionsparameter,
 $\alpha 95$ =Konfidenzwinkel, alle Winkelangaben in Grad

Tab. MUS I: Paläomagnetik Ergebnisse des Musran Komplexes.

Abb. MUS 1: Wechselfeld- (rechts) und thermische (links) Entmagnetisierung des Kerns 11-10 dargestellt anhand von Zijdeveld-Diagrammen und Entmagnetisierungskurven.

MUS 1



Abu Nahal

Der Abu Nahal Komplex mit 25-30 km Durchmesser ist eine der größeren Ringstrukturen in der Bayuda-Wüste. Der Komplex wurde von BARTH u. MEINHOLD (1979) kartiert. Er bildet eine Gebirgskette mit Höhen von mehr als 300 m und steilen Abbrüchen. Das Gebiet ist extrem unzugänglich.

Eine radiometrische Altersdatierung an Graniten und porphyrischen Gängen ergibt 237 Ma (BARTH et al., 1983).

Die Unzugänglichkeit und die klimatischen Bedingungen erlaubten nur Kerne von 3 Vorkommen zu ziehen. Weiterhin wurden orientierte Handstücke gesammelt.

Auch hier ist die Intensität der NRM zu gering für eine paläomagnetische Bearbeitung.

Razam Al Atjan

Der Razam Al Atjan Komplex ist ein domähnliches Syenit-Massiv (BARTH u. MEINHOLD, 1979) im nördlichen Teil der Bayuda. Er erhebt sich steil über die Basement-Ebene und hat eine Erstreckung von 1.5 x 3 km. Die radiometrischen Altersbestimmungen an Trachyten und Syeniten ergeben eine gemeinsame Isochrone mit einem jurassischen Alter (165 ± 8 Ma) (BARTH et al., 1983).

Das beprobte Material ist entweder sehr stark verwittert oder zu schwach magnetisch.

Singeir

Der Singeir Komplex besteht aus einer tief erodierten Ringstruktur mit ca. 15 km Durchmesser. Er besteht aus exzentrisch angeordneten, inneren Ringen von Alkaligraniten und zahlreichen äußeren Ringen von Alkalirhyolit-Gängen. Das Dach und die Ränder der Intrusion bilden eine hybrid-syntektische Fazies aus Basement und Intrusion (BARTH u. MEINHOLD, 1979). Das Alter der Intrusion ist auf 432 Ma (Rb/Sr, BARTH et al., 1983) bestimmt.

Die syntektische Dachfazies um den Inselberg Jebel Abu Selim wurde beprobt. Die Proben waren meist zu schwach magnetisch und

TABELLE SIN I

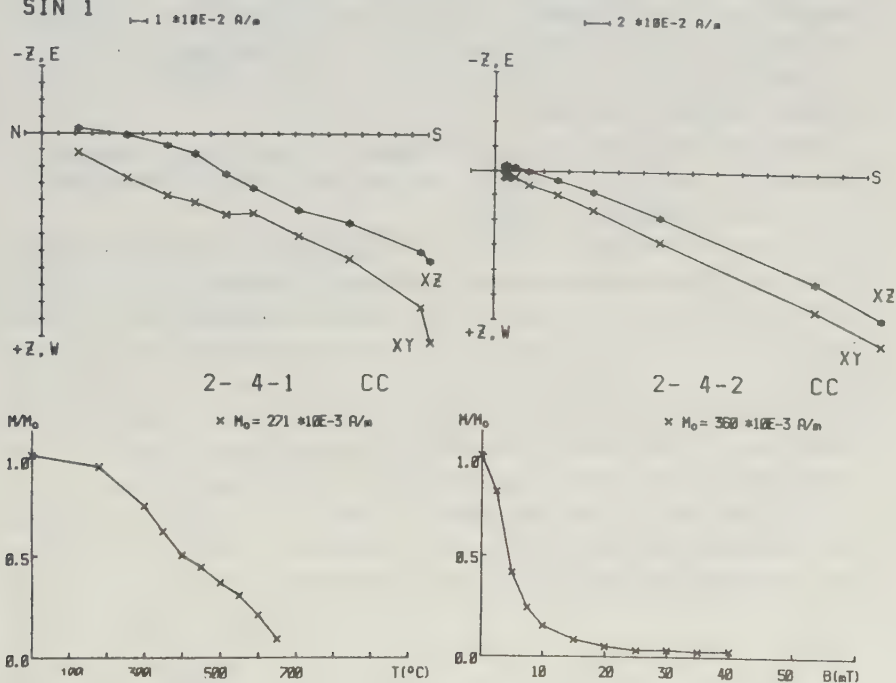
Paläomagnetik Ergebnisse von SINGEIR KOMPLEX (18.83°N, 33.50°E)

-Vorkommennittel-

Vork.	Nr	N	D	I	k	AF(nT)	CARM	N	D	I	k	α_{95}	UGP	(°N)	(°E)
2	10	197.0	-13.8	4.8	20	20	10	184.0	-32.6	8.6	17.5	86.1	134.0		

N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, k=Präzisionsparameter, α_{95} =Konfidenzwinkel; alle Winkel in Grad

SIN 1



Tab. SIN I: Paläomagnetik-Meßergebnisse des Singeir Komplexes. Proben von 9 weiteren Vorkommen konnten wegen zu geringer Magnetisierungsintensität nicht bearbeitet werden. Abb. SIN 1: Wechselfeld- (rechts) und thermische (links) Entmagnetisierung des Kerns 2-4 dargestellt anhand von Zijdeveld-Diagrammen und Entmagnetisierungskurven.

nicht frisch. An einem Vorkommen konnten NRM-Richtungen bestimmt und Entmagnetisierungsexperimente durchgeführt werden (Tab. SIN I u. Abb. SIN-1). Die erhaltene, mittlere Richtung soll wegen der ungenügenden Datenbasis nicht interpretiert werden.

Tuleih

Der Tuleih-Komplex liegt nordöstlich des Sabaloka-Ringkomplexes (Abb. SAB-1). Er ist eine relativ kleine (ca. 5 x 3 km) Intrusion, hauptsächlich aus Syenit bestehend, die von vielen Gängen durchschnitten wird. Für die Syenite wurde von HARRISON et al. (1983) ein Rb/Sr Alter von 465 ± 14 Ma erhalten.

Syenite und Gänge wurden an 11 Vorkommen, über den ganzen Komplex verteilt, beprobt.

Die NRM-Intensitäten sind breit verteilt zwischen 1 und $10\,000 \cdot 10^{-3}$ A/m (Abb. TUL-1). Eine Korrelation zu der Lithologie kann nicht festgestellt werden.

Die NRM-Richtungen streuen stark und die Vorkommenmittelwerte sind mit Präzisionsparametern k kleiner 3 unzureichend definiert (Tab. TUL I). Die Vorkommenmittel gruppieren ebenfalls nur mäßig um eine mittlere Richtung, ähnlich dem heutigen Erdfeld (Abb. TUL-2).

Die Entmagnetisierungsversuche führen zu keinem Resultat; es liegt eine weitgehend einkomponentige Magnetisierung vor. Die große Streuung der Richtungen kann nicht reduziert werden.

Die innerhalb eines Vorkommens um bis zu 3 Dekaden varierende Magnetisierungsintensität macht Überprägung durch Verwitterung und Blitzschlagmagnetisierung wahrscheinlich.

Qeili

Der ovale Jebel Qeili-Komplex hat eine Ausdehnung von ca. 4 x 2 km und erhebt sich bis zu 200 m über die umliegende Butana-Ton-Ebene. DELANY (1955) erkannte als erste die Ringstruktur. Der Komplex stellt eine flache magmatische Intrusion dar und besteht aus mehreren Syenit- und Granitpropfen in Verbindung mit frühen, geringen Mengen von Gabbro-, Dolerit- und Rhyolitlaven (AHMED,

TABELLE TUL I

Paläomagnetik Ergebnisse von TULEIH KOMPLEX (16.42°N, 32.83°E)
-Vorkommenmittel-

Vork.Nr	NRM N	D	I	k	Lithologie
180	10	320.0	33.0	2.8	intermed.Gang
181	6	344.2	56.7	25.7	intermed.Gang
182	13	353.0	64.1	1.7	Syenit
183	11	16.6	52.4	3.5	Syenit
184	10	269.4	19.2	1.6	Syenit
185	14	269.4	52.0	2.3	Syenit
186	13	61.1	72.0	3.3	Gang
187	13	68.9	-69.6	1.5	Gang
188	22	7.2	13.5	1.6	Syenit
189	28	42.9	11.1	1.1	Syenit
110	25	346.0	7.5	4.2	Syenit

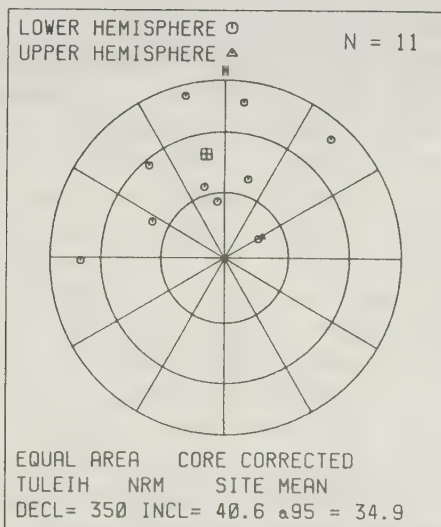
Mittel der Vorkommenmittel:

11 350.0 40.6 2.7

N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, k=Präzisionsparameter;
alle Winkelangaben in Grad

Tab. TUL I: Paläomagnetik-Meßergebnisse des Tuleih Komplexes. Es sind die Kennwerte der NRM angegeben.
Abb. TUL 1: NRM-Intensitätsverteilung (halblogarithmischer Maßstab). 163 Proben wurden bearbeitet.
Abb. TUL 2: Projektion der NRM-Vorkommenmittel im Schmidt'schen Netz. Das Gesamtmittel ist durch ein Quadrat mit Kreuz gekennzeichnet.

TUL 2



TUL 1

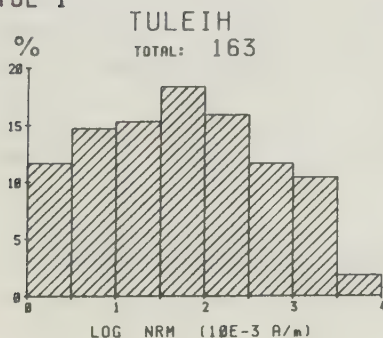


TABELLE QEI I

Paläomagnetik Ergebnisse von QEILI Komplex (15.50°N, 33.75°E)
-Vorkommenmittel-

Vork.Nr	NRM N	D	I	k	Lithologie
145	15	82.7	43.3	7.0	Gabbro
146	35	311.1	70.3	2.0	Syenit+Gang
147	15	319.1	33.1	4.9	Syenit
148	14	74.1	69.4	2.5	Syenit
149	8	zu schwache Magnetisierung			Gang
150	16	64.	8.2	5.5	Syenit
151	17	239.6	-21.5	4.1	Gang
152	14	354.9	1.7	1.9	Gang
153	13	183.0	60.8	1.3	Rhyolit
154	7	329.8	-2.0	4.7	Gang
155	7	72.6	50.1	3.1	Syenit

Mittel der Vorkommenmittel:

10 24.0 29.5 2.1

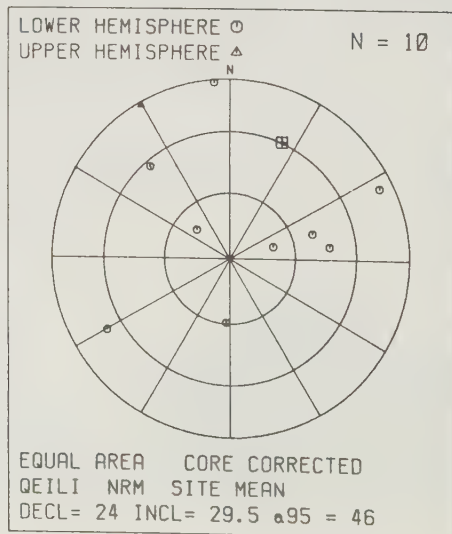
N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, k=Präzisionsparameter;
alle Winkelangaben in Grad

Tab. QEI I: NRM-Meßergebnisse für den Qeili Komplex.

Abb. QEI 1: NRM-Intensitätsverteilung (halblogarithmischer Maßstab). 186 Proben wurden bearbeitet.

Abb. QEI 2: Projektion der NRM-Vorkommenmittel im Schmidt'schen Netz. Gesamtmittel ist durch ein Quadrat mit Kreuz gekennzeichnet.

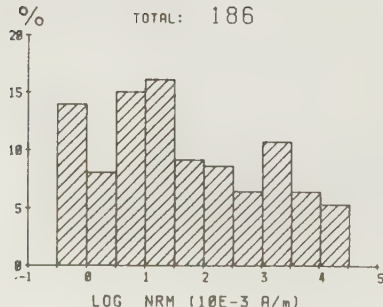
QEI 2



QEI 1

QEILI

TOTAL: 186



1975). Radiometrische Alter liegen noch nicht vor, ein ordovizisches Alter wird vorläufig vermutet (AHMED, 1975). Eine K/Ar-Altersbestimmung an den Gabbros ist zur Zeit in Vorbereitung (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, pers.Mittl.)

11 beprobte Vorkommen decken ein breites Spektrum der vorhandenen Lithologie ab: Gabbros, Rhyolite, Syenite und Gangmaterial. Dies spiegelt sich in einer über 5 Dekaden reichende NRM-Intensitätsverteilung wieder (Abb. QEI-1). Vorkommen 149 war unterhalb der Meßgrenze magnetisiert. Sowohl die Richtungsstreuung innerhalb der wie zwischen den Vorkommen ist sehr groß (Tab. QEI I u. Abb. QEI-2)

Umfangreiche Entmagnetisierungsexperimente führten zu keiner gemeinsam definierten stabilen Endrichtung.

Mögliche Gründe hierfür können sein:

- Verwitterung mit Entstehung sekundärer Remanenzen zu verschiedenen Zeitpunkten
- unentdeckt gebliebene Kleintektonik wie Kippungen oder Rotationen
- Blitzschlagmagnetisierung

Tushka

Entlang des im Bau befindlichen Tushka-Kanals nahe dem Westufer des Assuan Stausees wurden bis jetzt in der Literatur nicht bekannte Basalte beprobt. Gleichzeitig mit der paläomagnetischen Bearbeitung wurden von HORN u. MÜLLER-SOHNUS (1985) an den frischen und geringe Spuren einer deuterischen Alteration aufweisenden Gesteinen und daraus separierten Feldspäten K/Ar-Retentionsalter von 90-94 Ma bestimmt.

10 Vorkommen mit starken NRM-Intensitäten zwischen 1 000 und 300 000·10⁻³ A/m (Abb. TUS-1) liefern kaum gruppierende Richtungen (Tab. TUS I u. Abb. TUS-2). Sowohl für Vorkommenmittel als auch für das Gesamtmittel sind die Präzisionsparameter sehr klein. Umfangreiche Entmagnetisierungsversuche führten zu keiner merklichen Verringerung der Richtungsdispersion.

Die AF-Entmagnetisierung (Abb. TUS-3) weist auf einen sehr weichen Träger der Magnetisierung, die MDF liegen unter 5 mT; ca.

TABELLE TUS 1

Paläomagnetik Ergebnisse von TUSHKA BASALTEN (22.75°N, 31.50°E)

-Vorkommennittel-

Vork.Nr	NRM N	D	I	k
90	20	271.6	6.4	2.3
91	18	253.0	-9.5	1.1
92	23	248.9	19.0	5.4
93	24	268.7	-44.3	1.2
94	24	26.1	54.6	2.4
95	28	338.2	50.9	2.0
96	33	108.4	27.2	1.5
97	5	207.4	12.9	6.4
98	27	92.8	43.0	1.2
99	20	348.9	18.1	110.3

Mittel der Vorkommennittel:

10 275.2 47.5 1.5

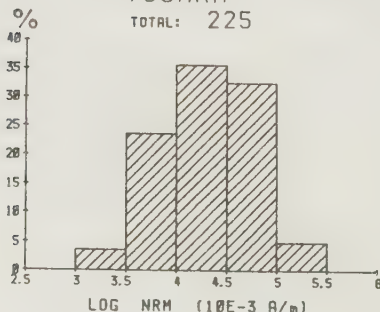
N=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, k=Präzisionsparameter:
alle Winkelangaben in Grad

Tab. TUS 1: Meßergebnisse der NRM an den Tushka Basalten

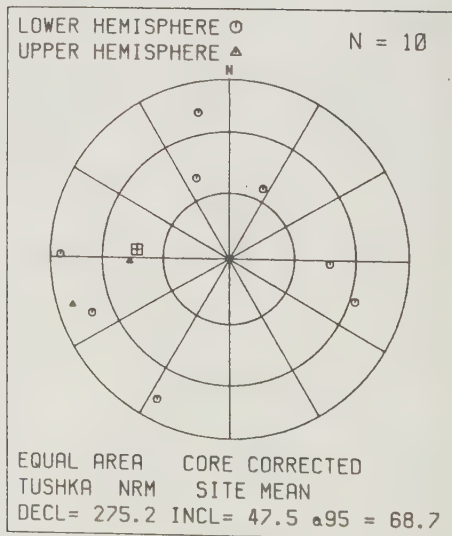
Abb. TUS 1: NRM-Intensitätsverteilung (halblogarithmischer Maßstab). 225 Proben wurden bearbeitet.

Abb. TUS 2: Projektion der NRM-Vorkommennittel im Schmidt'schen Netz. Das Gesamtmittel ist durch ein Quadrat mit Kreuz gekennzeichnet.

TUS 1

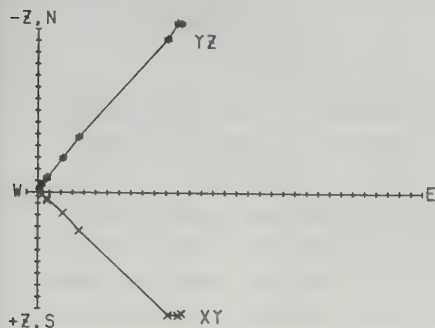


TUS 2

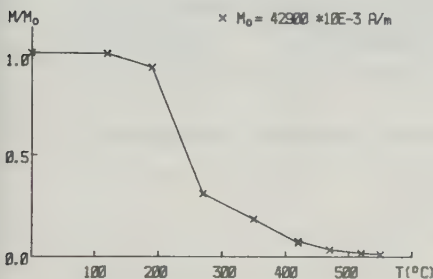


TUS 3

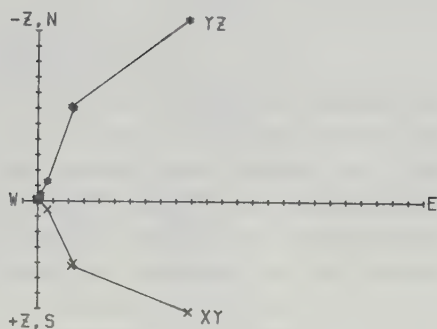
$\rightarrow 2 \cdot 10^6 \text{ A/m}$



98- 3-2 CC



$\rightarrow 2 \cdot 10^6 \text{ A/m}$



98- 3-1 CC

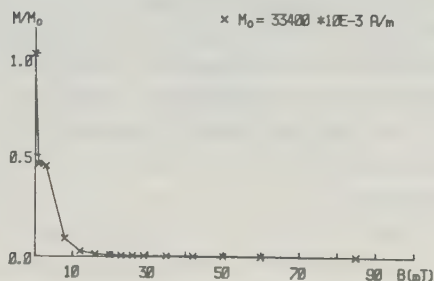
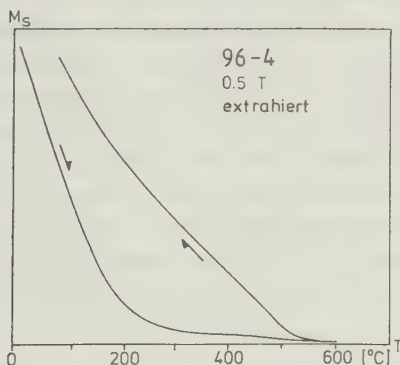


Abb. TUS 3: Wechselfeld- (rechts) und thermische (links) Entmagnetisierung des Kerns 98-3. Dargestellt sind Zijdeveld-Diagramme und Abmagnetisierungskurven.

Abb. TUS 4: $M_s(T)$ -Kurve an magnetisch extrahierten Material der Probe 96-4. Die Curietemperatur von ca. 200°C weist auf unentmischten Titanomagnetit als Träger der Magnetisierung hin.

TUS 4



90 Prozent der Magnetisierung sind in Feldern von 10 mT abgebaut. Thermische Behandlung (Abb. TUS-3) zwischen 200° und 400° C baut über 50 Prozent der Remanenz ab. Ab 550°C ist keine meßbare Remanenz mehr vorhanden. Diese Fakten in Kombination mit Curie-temperaturen von 250° bis 300°C (Ms(T)-Kurve in Abb. TUS-4) deuten auf unentmischten Titanomagnetit als Magnetisierungssträger hin. Die Anschliffe zeigen bis zu 500 µm große Erzkörner: primären Ilmenit, Titanomagnetite mit sehr selten auftretenden Ilmenit-Entmischungslamellen sowie in geringem Ausmaß Sulfid. Nach der Klassifikation von WILSON u. WATKINS (1967) liegt Oxidationsstufe II vor. Anzeichen von Tieftemperaturoxidation sind in unterschiedlichem Ausmaß vorhanden.

Das geringe MDF ist durch die großen, eine nur wenig stabile Magnetisierung tragenden Mehrbereichsteilchen der Titanomagnetite begründet.

Im Gelände konnten nur Aufschlüsse zweifelhafter tektonischer Lage aufgespürt und beprobt werden. Auf niedrigen, sanften Hügeln meist bedeckt mit Lesesteinen und Sand ist eine Beprobung im sicher anstehenden Gestein nicht möglich. Der Mißerfolg der Paläomagnetik muß in der Kombination von schlechten Aufschlußbedingungen und der geringen Stabilität der Magnetisierung gesucht werden.

Tehilla

Eine der besser untersuchten Ringstrukturen im östlichen Sudan ist der Tehilla-Komplex (DELANY, 1955; AHMED, 1977b). Er ist bimodal in Zusammensetzung mit einer früheren, basischen Phase aus Gabbros, genauer Troktoliten und Noriten, und einer späteren, sauren Phase aus vornehmlich Graniten, die in steil einfallenden Cone Sheets intrudierten. Eine milde thermische Metamorphose der basischen Phase ist wahrscheinlich das Resultat einer leichten Temperaturerhöhung in Verbindung mit der Platznahme der Granite (AHMED, op.cit.). Eine zentrale Ebene ist umgeben von einem Ring bis zu 300 Meter hoher Berge, der ganze Aufschluß hat die Ausmaße von 16 x 11 km.

TABELLE TEH I

Paläomagnetik Ergebnisse von TEHILLA KOMPLEX (17.78°N, 36.18°E)
-Vorkommenmittel-

Vork.Nr	NRM N	D	I	k	Lithologie
156	25	334.3	38.5	3.8	Gabbro
157	21	350.9	34.9	17.5	Gabbro
158	24	341.9	22.9	24.9	Gabbro
159	32	353.7	25.7	5.9	Gabbro
160	24	28.6	-66.1	2.1	bas. Gang
161	31	18.4	65.8	1.6	Gabbro
162	22	323.9	44.4	2.2	Gabbro
163	15	283.9	-59.6	3.7	Gabbro
164	26	18.1	26.7	1.4	Gabbro
165	28	346.3	29.9	3.4	Gabbro
166	16	351.4	32.7	4.7	Adamellit-Gang
167	15	3.1	58.9	4.3	Granit

Mittel der Vorkommenmittel:

12 353.9 34.7 5.7

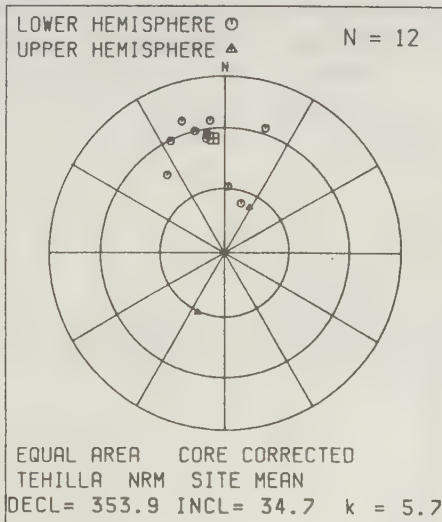
M=Probenzahl, D=Deklination, I=Inklination, k=Präzisionsparameter, Winkel in Grad

Tab. TEH I: Paläomagnetik-Meßergebnisse für den Tehilla Ring-komplex.

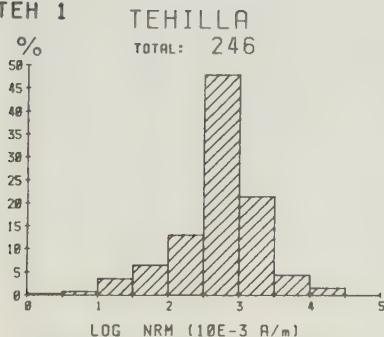
Abb. TEH 1: NRM-Intensitätsverteilung (halblogarithmischer Maßstab). Es wurden 246 Proben bearbeitet.

Abb. TEH 2: Projektion der NRM-Vorkommenmittel im Schmidt'schen Netz. Die NRM-Vorkommenmittel gruppieren um eine Richtung ähnlich dem heutigen Erdfeld. Das Gesamt-mittel ist durch ein Quadrat mit Kreuz gekennzeichnet.

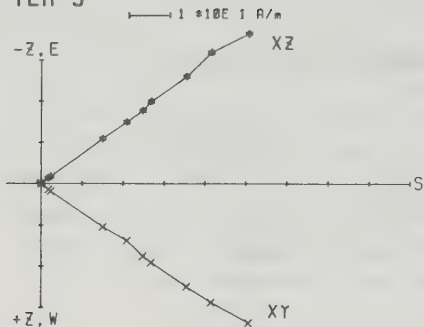
TEH 2



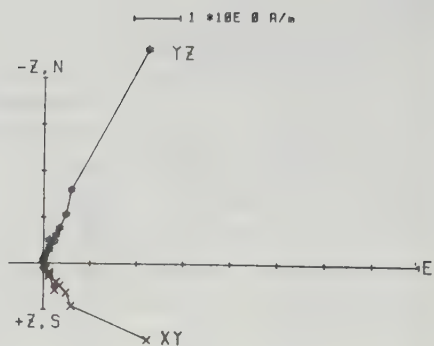
TEH 1



TEH 3



162- 5-2 CC



160- 5-1 CC

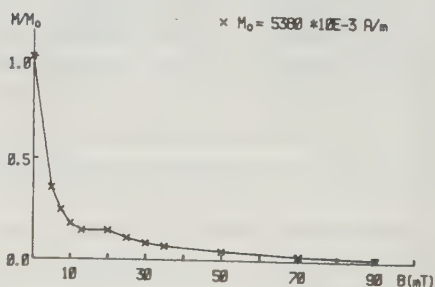
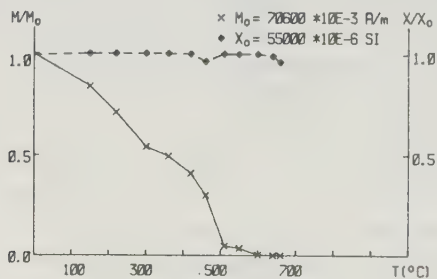
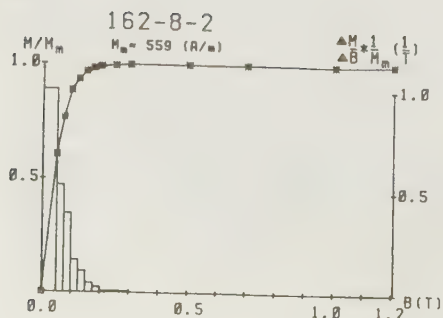


Abb. TEH 3: Wechselfeld- (rechts) und thermische (links) Entmagnetisierungsversuche am Beispiel der Proben 162-5-2 und 160-5-1. Dargestellt sind Zijdeveld-Diagramme und Abmagnetisierungskurven mit Suszeptibilitätsverlauf.

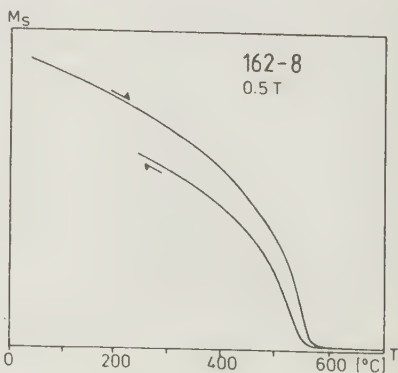
Abb. TEH 4: IRM-Erwerbskurve und Koerzitivkraftspektrum der Probe 162-8-2. Sättigung wird bei 0.2 Tesla erreicht.

Abb. TEH 5: $M_s(T)$ -Kurve an Material des Kerns 162-8. Die Curie-temperatur von ca. 560°C und die Ergebnisse der röntgenographischen Untersuchung (siehe Abb. 15) weisen auf Magnetit als Magnetisierungsträger.

TEH 4



TEH 5



Analysen an Graniten und Noriten ergeben scheinbare K/Ar-Gesamtgesteinsalter von 548 ± 12 Ma und respektive von 646 ± 14 Ma (VAIL, 1976). K/Ar-Analysen an Biotiten des Granits liefern scheinbare Alter von 597 und 581 Ma (ALI, 1979).

An 9 Vorkommen wurden in der zentralen Ebene Gabbros, aufgeschlossen an kleinen Hügeln, beprobt. Zusätzlich wurden von einem basischen und einem Adamellit-Gang sowie einem Vorkommen aus dem Granit-Ringgang Kerne gezogen.

Die Proben der granitischen Gesteine besitzen remanente Magnetisierungen zwischen 1 und $100 \cdot 10^{-3}$ A/m, während die Gabbros Intensitäten von bis zu über $10\,000 \cdot 10^{-3}$ A/m annehmen (Abb. TEH-1).

Granite wie auch Gabbros sind durch im Wechselfeld extrem instabile Magnetisierungen gekennzeichnet (Abb. TEH-3). Felder von 10 mT sind ausreichend, um 60-90 % der Magnetisierung abzubauen. Thermische Behandlung (Abb. TEH-3) führt zu einer kontinuierlichen Abmagnetisierung bis zu Temperaturen von ca. 550°C. Das Richtungsverhalten beim Entmagnetisieren ist meist durch das Vorhandensein einer einzigen Komponente gekennzeichnet, die große Streuung der NRM innerhalb der Vorkommen (Tab. TEH I) kann nicht verringert werden. Die gemittelten NRM-Richtungen der Vorkommen gruppieren um die Richtung des heutigen Erdfeldes (Abb. TEH-2). Dies und die geringe Stabilität der Magnetisierung weisen auf völlige Überprägung der remanenten Magnetisierung durch das heutige Erdmagnetfeld hin.

Ms(T)-Kurven mit Curiepunkten von 560°C (Abb. TEH-5), Gitterkonstanten von 8.394 Å (Abb.15 mit Tab.VIII) und IRM-Erwerbskurven mit Sättigung bei ca. 0.2 T (Abb. TEH-4) identifizieren Magnetit als Träger der Magnetisierung.

Große Erzkörner (500 µm und mehr) bestehen aus primärem Ilmenit und Magnetit. Der in basischem Gestein ursprünglich vorhandene Titanomagnetit ist hier durch eine spezielle Form der Hochtemperaturoxidation, die interne Oxidation (PETERSEN, 1982), zu Magnetit und Ilmenit (in Lamellenform) entmischt. Dieser Prozeß ist für Gabbros und Diorite typisch; sie besitzen Curietemperaturen um 580°C.

Tabelle IX: Zusammenfassung der Paläomagnetik Ergebnisse: Als Paläopole sind die Südpole angegeben.

Lokation	Alter	Paläopol-Position im heutigen Referenzsystem		
		Lat (°)	Long (°E)	Age (°)
JEBEL GIFATA	oKreide-uTertiär	81.5 S	45.0	8.5
NORTHERN VOLCANIC				
FIELD	≈65 Ma ??	55.9 S	97.8	11.3
NUSAB EL BALGUM	≈216 Ma	64.1 S	50.7	5.1
SABALOKA	≈400 Ma	43.5 S	55.8	13.2
NABATI	≈580 Ma	67.9 N	314.1	13.6
BIR SAFAF	Kambrium	80.0 N	249.7	9.2
KADAWEB	≈720 Ma ?	1.0 N	319.6	19.8
keine Ergebnisse aus folgenden Gründen:				
TUSHKA:	≈90 Ma	geringe Stabilität, Gestein nicht in situ		
SILEITAT	≈165 Ma	zu schwache Magnetisierung		
RAZAM AL ATJAN	≈165 Ma	verwittert, zu schwache Magnetisierung		
ABU NAHAL	≈237 Ma	zu schwache Magnetisierung, schwer zugänglich		
MUSRAN	≈395 Ma	zu schwache Magnetisierung		
SINGEIR	≈433 Ma	verwittertes Material, zu schwache Magnetisierung		
TULEIH	≈465 Ma	verwittertes Material, starke Streuung		
QEILI	Ordovizium ?	starke Streuung		
TEHILLA	600-650 Ma ?	viskose, instabile Magnetisierung		

6.0. Diskussion und Ausblick

6.1. Diskussion der Meßergebnisse

Die im vorhergehenden Abschnitt erhaltenen Paläopollagen werden im Kontext der gesamtafrikanischen Polwanderkurve diskutiert. Die bereits in einer früheren Arbeit bestimmte Paläopollage von Jebel Gifata in der Dakhla Oase (SARADETH et al., 1986; SARADETH et al., in Druck) aus der Wende von Oberer Kreide zu unterem Tertiär wird in diese Betrachtung miteinbezogen.

In Tabelle IX sind alle Pollagen mit ihren Kenndaten aufgelistet und in Abbildung 16 mit ihren jeweiligen Konfidenzkreisen in einer flächentreuen Projektion aufgetragen.

Zur Darstellung kommen die für Afrika üblicherweise verwendeten Südpole. Da das Erdmagnetfeld sich im Laufe der geologischen Geschichte häufig umpolt, d.h. magnetischen Nord- und Südpol vertauscht, können Remanenzrichtungen und Pollagen, die sich nur in der Polarität unterscheiden, als äquivalent behandelt werden.

Die 7 Pollagen aus Ägypten und dem Sudan erlauben es, eine eigene Polwanderkurve für den Ostsaharakraton aufzustellen. Ein Vergleich mit der gesamtafrikanischen Kurve (Abb.17 u. 18) für die jüngere geologische Geschichte ergibt eine weitgehende Übereinstimmung. Eine merkliche Relativbewegung des Ostsaharakratons gegenüber dem übrigen Afrika kann die Paläomagnetik für die Zeit bis zurück ins Karbon ausschließen.

Die Jebel Gifata Paläopollage stimmt innerhalb der Fehlergenauigkeit mit den wenigen weiteren Pollagen des Unteren Tertiärs und Oberen Kreide aus Afrika überein. Sie ist ein wichtiger Beitrag, die Datenlücke in der Afrikanischen APWP zwischen 40 und 80 Ma (IRVING u. IRVING, 1982) zu schließen.

Der Nusab el Balgum Pol fällt in die mesozoische "quasi-stationäre" (IRVING u. IRVING, 1982) Periode von 85-230 Ma, eine

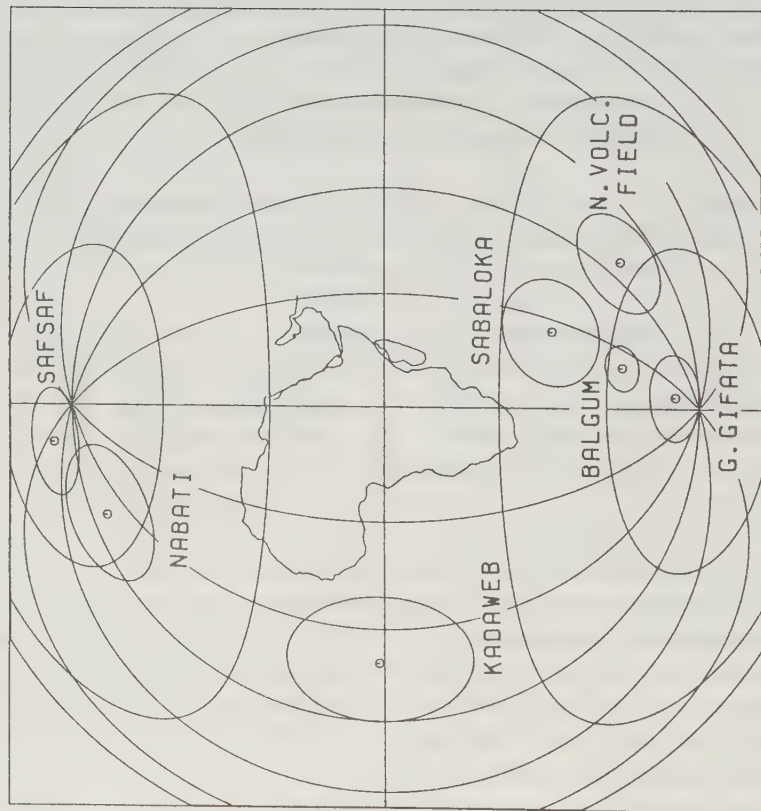


Abb.16: Projektion der ermittelten Pollagen aus Tabelle IX in eine flächentreue Lambert-Projektion. Dargestellt sind Südpole mit ihren jeweiligen Konfidenzkreisen.

Zeitspanne von fast 150 Ma, in der keine größere Bewegung des afrikanischen Paläopols auftritt. Quasistationär heißt das Intervall deshalb, weil nicht automatisch von einer stabilen Paläopol-lage auf eine Ruhepause in der Driftgeschichte geschlossen werden darf.

Das triassische Rb/Sr-"Errorchronen"-Alter (SCHANDELMEIER, 1984) wird durch die Paläomagnetik bestätigt. Einschränkend muß jedoch festgehalten werden, daß eine Altersbestimmung über die Paläomagnetik nur in Episoden schneller Wanderung des Paläopols hinreichend genau sein kann. Eine Datierung über Pollagen aus dem quasistationären Intervall ist, solange keine feineren Bewegungen aufgelöst werden können, nicht genauer als die Gesamtdauer des Intervalls von 150 Ma.

Die Pollagen von Nabati (580 Ma, kambrisch) und Bir Safsaf (500-600 Ma, kambrisch) etablieren für das untere Paläozoikum eine Lage des (scheinbaren Paläo-) Südpols nördlich von Afrika. Dies steht in Übereinstimmung mit den wenigen, bisherigen Pollagen Gondwanas für das Ordovizium und Kambrium.

Die Pollage und das Alter der Basalte des Northern Volcanic Fields lassen sich mit der Afrikanischen APWP nicht so gut vereinbaren. Betrachtet man die kleinen Bewegungen des Pols in dem mesozoischen quasistationären Intervall, wie sie von HARGRAVES u. ONSTOTT (1980) und SCHULT et al. (1981) dokumentiert werden, so wird deutlich, daß der Paläopollage des Basalts eher ein Unterkreide- bis Jura-Alter zugeordnet werden muß (Abb. 19). Das vorläufig bestimmte K/Ar-Alter ist demnach zu niedrig; eine Tatsache, die sich leicht durch Ar-Verlust erklären läßt. Diese Hypothese wird durch weitere K/Ar-Altersbestimmungen einschließlich Ätzversuchen bestätigt (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, pers. Mittl.).

Dies würde gleichzeitig bedeuten, daß die vulkanische Tätigkeit im Sudan in Zusammenhang mit dem Red Sea Rift nicht, wie angenommen, in der Oberen Kreide (ALMOND, 1984), sondern bereits früher einsetzte.

Die Alternative, die Abweichung durch eine Drehung des Unter-

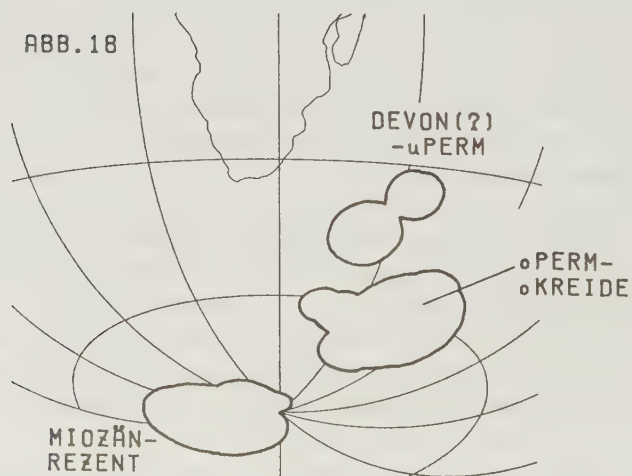
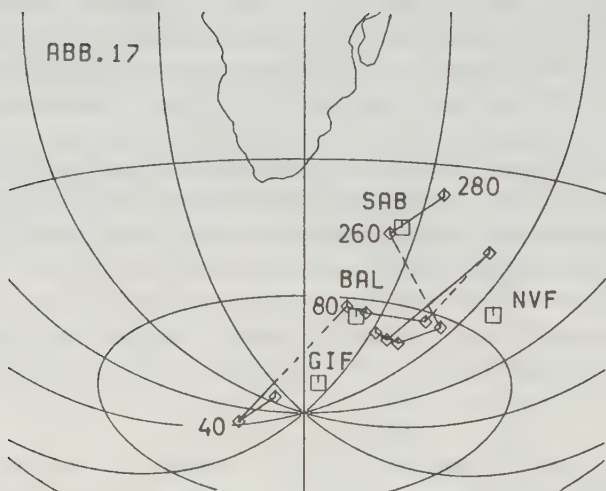


ABB. 19

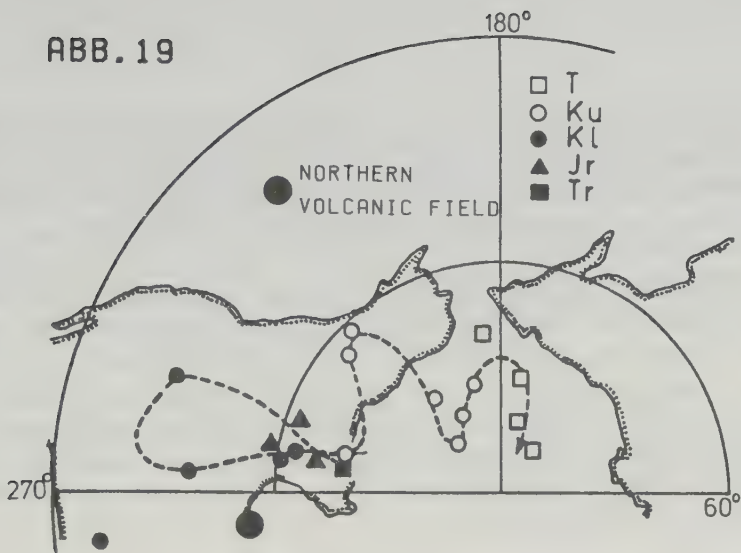


Abb.17 (gegenüberliegende Seite): Der generelle Verlauf der APWP (Südpole) Afrikas für die Zeit von 0 bis 280 Ma ist dargestellt und wird mit eigenen Ergebnissen verglichen. IRVING u. IRVING (1982) berechnen in 10 Ma Intervallen mittlere Paläopolpositionen über ein Fenster von 30 Ma Länge. Für die Zeitbereiche 260-240 Ma, 160-120 Ma und 80-40 Ma existieren Datenlücken. Dargestellt sind hier die Mittelwerte (kleine Rauten) im Abstand von 20 Ma und eigene Ergebnisse (Quadrate). (GIF=Gebel Gifata, NVP=Northern Volcanic Field, BAL=Balgum, SAB=Sabaloka).

Abb.18 (gegenüberliegende Seite): Die von IRVING u. IRVING (1982) im 10 Ma Abstand berechneten Mittelwerte der Paläopollagen Afrikas (siehe Legende Abb.17) werden mit ihrem jeweiligen Vertrauenskreis umgeben. Mittelwerte werden ausgesondert, wenn nur eine Pollage im 30 Ma Fenster vorliegt. Dargestellt sind nur die äußeren Umhüllenden dieser Konfidenzkreise. Deutlich sind die 3 quasistationären Perioden (von Karbon (Devon?) bis Unteres Perm, Oberes Perm bis Oberkreide und Miozän bis rezent). Die quasistationären Perioden werden unterbrochen von Drift-Episoden.

Abb.19: APWP für Afrika im Mesozoikum (aus SCHULT et al., 1981). Dargestellt sind Pollagen auf der Nordhalbkugel (Nordpole). Die Pollage des Northern Volcanic Fields ist innerhalb der Fehlergenauigkeit mit anderen afrikanischen Pollagen aus dem Jura und der Unterkreide vereinbar. (T=Tertiär (Paläozän), Ku=Oberkreide, Kl=Unterkreide, Jr=Jura, Tr=Trias-Mittelwert)

suchungsgebiets von ca. 30° gegen den Uhrzeigersinn zu erklären, kann ausgeschlossen werden, da sonst alle älteren und sich in Übereinstimmung mit Ergebnissen aus anderen Teilen Afrikas befindenden Pollagen ebenfalls mitgedreht werden müßten.

Auch wenn über das Alter der Kadaweb Pollage noch Unsicherheiten bestehen, kann der bis jetzt völlig offene Verlauf der APWP im Oberen Proterozoikum weiter eingegrenzt werden. Die Pollage ist weit abgesetzt von der APWP im Phanerozoikum und damit kann eine post-panafrikanische magnetische Überprägung sicher ausgeschlossen werden. Die Pollage ist ein starkes Argument für den APWP-Vorschlag von McELHINNY u. EMBLETON (1976) im Oberen Proterozoikum (siehe Abb.6).

Der Sabaloka Pol fällt in eine kritische, da noch kaum mit Pollagen dokumentierte Phase Gondwanas im mittleren Paläozoikum. Für das bis vor kurzem als devonische Referenzpollage gehaltene Ergebnis am Mssisi Norit (HALLWOOD, 1974) ist jüngst gezeigt worden, daß zum einen das Alter der Intrusion Oberjura bis Unterkreide ist und weiterhin daß eine weitaus komplexere Magnetisierung, als bisher angenommen, vorliegt (SALMON et al., 1986).

Zudem stammen die meisten der weiteren Paläopole aus dieser Zeit für Gondwana aus dem Tasmanischen Faltengürtel in Südost-Australien. Da die paläogeographische Relation dieses Tasmanischen Terrains in Bezug auf das kratonale Australien während des mittleren Paläozoikums weiterhin unklar ist (CROOK, 1980), gilt dies auch für die Interpretation der Paläomagnetik-Daten für Gondwana als Ganzes. Als Resultat dieser Unklarheit wurden mehrere mögliche APWP Gondwanas vorgeschlagen (siehe Abb.2 bis 5).

Die devonische Pollage Sabalokas südöstlich der Südspitze Afrikas, in der Nähe der Karbonpole bedeutet, daß

- die quasistationäre Periode vom unteren Perm bis zurück ins Karbon bereits im Devon einsetzte
- dies wiederum erfordert zuvor eine Phase schneller Drift zwischen dem Ordovizium mit Pollagen im Norden von Afrika und dem

Devon mit Pollagen im Süden von Afrika

- der APWP-Verlauf ist wie in Abbildung 2 dargestellt, doch mit einem unterschiedlichen zeitlichen Verlauf.

Diese Hypothese wurde von KENT et al. (1984) aufgestellt und wird durch eine unter- bis mitteldevonische Pollage (35.2°S, 43.6°E) der Gneigura Supergroup aus Marokko (KENT et al., op.cit.) sowie die Sabaloka-Pollage gestützt.

Neuere Arbeiten aus Australien und Afrika scheinen dazu im Widerspruch zu stehen: SCHMIDT et al. (1986) erhalten für die Comerong-Vulkanite des Tasmanischen Faltengürtels eine Paläopol-lage westlich von Namibia bei 25.8°S und 5.4°E (im afrikanischen Referenzsystem). Das Alter der Vulkanite kann durch einen Falten-test eng auf spätes Mitteldevon bis frühes Oberes Devon begrenzt werden. Doch sind hier Lagekorrektur und Fragen der Autochthonie nicht sicher geklärt.

Ein spät-silurischer bis früh-devonischer (ca. 400 Ma) Air-Ringkomplex im Kraton-Bereich Afrikas liefert einen Paläopol gerade südwestlich von Kapstadt bei 42.1°S und 9.3°E (HARGRAVES u. DAWSON, in prep.; HARGRAVES u. van HOUTEN, 1985). Eine Beurteilung der Aussagekraft dieser Polbestimmung ist mit den vorliegenden Daten zur Zeit noch nicht möglich.

Letztere Ergebnisse scheinen die These von MOREL und IRVING (1978) zu unterstützen, die eine paläozoische APWP vorschlagen, die eine relativ schnelle SSW-Exkursion mit teilweiser Umkehr zum alten Verlauf aufweist (Abb. 4). Jedoch würde dies eine Neubeurteilung vieler Pole, die zuvor als silurisch-devonisch eingestuft waren, zur Folge haben; u.a. müßte auch für Gneigura und Sabaloka eine Remagnetisierung (wahrscheinlich im Karbon) gefordert werden.

Diese 2 Alternativ-Vorschläge für den APWP-Verlauf Gondwanas im Mittelpaläozoikum haben weitreichende paläogeographische Auswirkungen: Wenn Sabaloka und Gneigura primäre Magnetisierungen aufweisen und nicht eine spätere Überprägung, dann befindet sich der mitteldevonische Nordrand Gondwanas auf 15°S in tropischen Breiten anstatt bei 45°S; kein weiter Ozean würde die Ränder

Gondwanas und Laurasias trennen und ein Pangaea-ähnlicher Zusammenschluß von Nord- und Südkontinenten wäre mit Ende des Devon bereits erreicht (SCOTese et al., 1985). Dafür gibt es eine Reihe von unabhängigen Argumenten:

Biogeographische Gründe sprechen gegen einen weiten, trennenden Ozean im frühen Devon (COCKS u. FORTEY, 1982; BARRETT, 1984). Der Ozean zwischen beiden Kontinenten war nicht breit genug, um eine Migration von benthischen, Flatschelf-Faunen zu verhindern (SCOTese et al., 1985).

Im frühen Karbon kommt es dann zu der Kollision des Nordrands Gondwanas mit Baltika entlang des Varistischen Orogens. Um einen großen, devonischen Ozean zu schließen, müßte Gondwana mit zumindest für große Kontinentalplatten ungewöhnlich hohen Geschwindigkeiten von ca. 15 cm/a nach Norden gedriftet sein (SCOTese et al., op. cit.).

Zusätzliche Indikatoren wie Tillite als Spuren ehemaliger Vereisungen und Verteilung von Kalt- und Warmwasserfaunen sind dürftig und oft widersprüchlich (van HAUTEN u. HARGRAVES, 1986).

Eine Klärung des mittelpaläozoischen APWP-Verlaufs Gondwanas ist ohne weitere, sicher datierte Polbestimmungen aus eindeutig kratonalen Bereichen nicht möglich.

In einem letzten Schritt soll versucht werden, mögliche Zusammenhänge zwischen regionalen Intraplattenereignissen und der Driftgeschichte Afrikas sowie Vorgängen an den Plattenrändern aufzuzeigen.

Dazu wurden aus der Literatur eine unvollständige Liste geologischer Vorgänge, die für eine Korrelation geeignet erscheinen, zusammengestellt. Hierbei handelt es sich um regionaltektonische Vorgänge, wie Becken- und Schwellenbildung, Bruchbildung und Reaktivierung sowie epirogenetische Bewegungen (Tab. X).

Fehlende Ursache-Wirkung Beziehungen und große mögliche Zeitverschiebungen zwischen Ursachen und beobachtbaren Phänomenen erschweren eine Korrelation erheblich.

Nach IRVING u. IRVING (1982) lassen sich in der jüngeren afrikanischen APWP 3 Perioden relativer Stabilität der Pollage, soge-

nannte quasistationäre Perioden von Intervallen mit ziemlich schneller Wanderung der Polposition, sogenannte Drift-Episoden, unterscheiden (Abb. 17 u. 18). Die 3 quasistationären Perioden umfassen die Zeitbereiche Miozän bis rezent, die mesozoische Periode vom Oberen Perm bis in die Obere Kreide und eine Periode vom Oberen Karbon, vielleicht auch bereits vom Devon, wie es die Sabalokapollage andeutet, bis ins Untere Perm.

Dabei ist es im strengen Sinn nicht korrekt, direkt von der scheinbaren Bewegung des Paläopols relativ zu einer Platte auf die Geschwindigkeit dieser Platte zu schließen. Dazu bedarf es der Kenntnis des tektonischen Rotationspols, der die Bewegung einer Platte durch die Zeit beschreibt. Trotzdem ist es realistisch, Episoden schneller scheinbarer Polbewegung mit Episoden

Tabelle X: Versuch der Korrelation von Intraplattenereignissen im Untersuchungsgebiet und der Driftgeschichte Afrikas wie sie sich aus der scheinbaren Polwanderkurve (APWP) ergibt.

Zeit	Drift	Geologie
Silur- uPerm	unsicher, große Drift?	Pause in intrusiver und extrusiver Aktivität in Gebiet Uweinat-Safsaf (SCHANDELMEIER u. DARBYSHIRE, 1984)
Trias	Pangaea B wird zu Pangaea A durch Drehung Gondwanas (IRVING, 1983)	Intraplatten Vulkanismus in SW-Ägypten und NW-Sudan (FRANZ et al., 1986)
Mesozoikum	quasistationäre Periode	Tektonische Stabilität des Afro-Arabischen Kontinents (SALAMA, 1985)
Jura	kleine Schleifen ("loops") in der APWP	Umkehr epirogenetischer Bewegungen in NW-Sudan und angrenzenden Gebieten (KLITZSCH, 1984)
Tertiär	Driftepisode	Start vulkanisch-tektonischer Aktivität entlang vorhandener Schwächezonen auf der Afro-Arab. Platte (SALAMA, 1985)

schneller Plattenbewegung gleichzusetzen. Ähnlich kann für Intervalle, in denen Paläopole statistisch nicht mehr unterscheidbar sind, von einer stationären Platte ausgegangen werden.

Mögliche Korrelationen werden in Tabelle X angedeutet. Die mesozoische tektonische Ruhe ist synchron zur quasistationären Periode im Mesozoikum und känozoischer Vulkanismus und tektonische Aktivität korrelieren mit einem ca. 25° Sprung der APWP im unteren Tertiär (siehe Abb. 17 u. 18).

6.2. Ausblick

Radiometrische Altersbestimmungen an bis jetzt undatierten Lokationen (an Qeili u. Bir Safsaf) sowie als zusätzliche Unterstützung und Präzisierung bereits vorliegender Daten (so bei Northern Volcanic Field, Balgum, Sabaloka und Nabati) sind in Vorbereitung (HORN u. MÜLLER-SOHNUS, pers.Mittl.). Diese Ergebnisse sind unentbehrlich, um das 2."Standbein" einer jeden Paläopolbestimmung, sein Alter, erstmalig bzw. besser zu definieren.

Eine große Anzahl von Ringkomplexen, v.a. in der östlichen Wüste Ägyptens, in der Bayuda Wüste und den Red Sea Hills sowie weitere Gesteinsformationen im Untersuchungsgebiet, bieten gute Möglichkeiten, die weiterhin offenen Fragen zu der APWP und Driftgeschichte Afrikas, vor allem im Paläozoikum, zu lösen.

Doch dazu bedarf es noch großer Anstrengungen: Viele Strukturen wurden auf noch bis vor kurzem geologisch weißen Flecken der Landschaft, wie z.B. im Gebiet südlich von Wadi Halfa, entdeckt und kartiert, Altersdaten liegen nur spärlich vor. Nähere Kenntnisse über Geologie, Petrologie etc. müssen angesammelt werden, bevor eine paläomagnetische Untersuchung sinnvoll ansetzen kann. Diese Vorerkundung ist bisher in der Bayuda Wüste und in den Red Sea Hills am weitesten fortgeschritten und weitere Arbeiten sollten hier anschließen.

Wünschenswert, aber gewiß in solch' entlegenen Gebieten nicht immer durchführbar, wäre, wie hier am Beispiel Sabaloka gezeigt, eine 2-Phasen Beprobung für die Paläomagnetik: In einer ersten Erkundungsfahrt werden möglichst viele potentielle Formationen

angefahren und eine erste, vorläufige Probenkollektion angelegt. Darauf folgende detaillierte Pilotuntersuchungen, die nur im Labor durchgeführt werden können, zeigen, ob das Material geeignet ist. Fragen wie Erzgehalt, Verwitterungszustand, Stabilität der Magnetisierung werden geklärt. In einer zweiten Beprobungsphase werden dann gezielt die geeigneten und erfolgversprechenden Lokationen erneut beprobt, so daß die strengen Forderungen der Paläomagnetik an die Probensammlung, die -wie gezeigt- an Quantität und damit verbundenem Aufwand weit über das hinaus gehen, was in anderen Disziplinen erforderlich ist, voll erfüllt sind.

7.0 Zusammenfassung

16 Lokalitäten im Nord-Sudan und Südwest-Ägypten wurden für eine Paläomagnetik-Untersuchung ausgewählt und in 3 Geländefahrten aufgesucht und beprobt.

6 Paläopollagen (komplette Liste in Tab.IX auf Seite 108) von Northern Volcanic Field Basalten (Bayuda-Wüste), Nusab el Balgum Komplex (SW-Ägypten), Sabaloka-Komplex (N-Sudan), Nabati-Komplex (Bayuda-Wüste), Bir Safsaf-Gängen (SW-Ägypten) und Kadaweb-Komplex (Red Sea Hills, NE-Sudan) konnten mit den Methoden der Paläomagnetik bestimmt werden. Parallel dazu durchgeführte gesteinsmagnetische Untersuchungen erlauben, Aussagen über Art und Träger der Magnetisierung zu treffen und die Verlässlichkeit der Polbestimmung zu beurteilen.

Die 6 bestimmten Pollagen überstreichen das Phanerozoikum und Obere Proterozoikum. Damit ist es möglich eine eigene APWP für den Ostsaharakraton aufzustellen. Eine signifikante Abweichung zu der gesamtafrikanischen APWP besteht nicht, eine Relativbewegung des Ostsaharakratons zu Restafrika kann für das Phanerozoikum ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse von Bir Safsaf, Nabati und Sabaloka erweitern die für Afrika und auch Gesamt-Gondwana nur sehr spärliche, paläozoische Paläopol-Datenbasis.

An Bir Safsaf-Gängen wurde von der Paläomagnetik ein altpaläozoisches Alter, das mittlerweile geochronologisch bestätigt werden konnte, postuliert.

Die Untersuchung des mittelpaläozoischen Sabaloka-Komplex zeigte, daß eine bisher als primär angesehene Magnetisierungskomponente sekundär als CRM entstanden ist. Dies wird durch einen Konglomerattest bestätigt. Der Widerspruch zu den radiometrischen Altersdaten konnte damit aufgelöst werden. Eine weitere, als primär interpretierte Magnetisierungsrichtung wurde erhalten. Auswirkungen auf die APWP Gondwanas und die Paläogeographie werden diskutiert.

Für Nabati und Nusab el Balgum konnten die vorliegenden Rb/Sr-Alter durch die paläomagnetischen Ergebnisse bestätigt werden.

Für die Basalte des Northern Volcanic Field deutet die Paläomagnetik auf ein Unterkreide bis Jura-Alter hin. Dies ist in Widerspruch zu einem vorläufigen, jüngeren K/Ar-Alter. Ar-Verlust muß angenommen werden.

Aus Gründen, die dargelegt wurden, kann für Kadaweb das Alter der Magnetisierung nicht genau festgelegt werden. Die Pollage eignet sich deshalb nicht zur Kalibrierung der APWP, ist aber gleichwohl wichtig, um den Verlauf der APWP weiter festzulegen.

Von den restlichen Lokalitäten konnte aus einer Reihe von Gründen keine sinnvolle Paläopolposition erhalten werden. Die Ursachen, wie zu geringer Gehalt an magnetischen Mineralien, viskose, instabile Magnetisierungen, epigenetische Remagnetisierung und andere wurden für jede Lokalität aufgeführt und Teilergebnisse, soweit vorhanden, präsentiert.

Mögliche Zusammenhänge zwischen der Driftgeschichte Afrikas, wie sie sich aus der APWP ergibt, und regionalen geologischen Ereignissen werden aufgezeigt.

Für die Messung der magnetischen Remanenz am Spinnermagnetometer wurde ein Fehlerparameter eingeführt. Dieser erlaubt die Abschätzung der internen Konsistenz einer Messung und die schnelle Beurteilung der Meßgüte.

Die Empfindlichkeit des Geräts kann somit empirisch bestimmt werden. Paläomagnetik-Messungen, die mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auf zufälligen Werten beruhen, können ausgeschieden werden. Eventuelle Meßfehler werden schnell entdeckt. Es wird gezeigt, daß in vielen Fällen die magnetische Instabilität der Proben und nicht die Geräteempfindlichkeit die begrenzende Schranke ist.

G L O S S A R:

Errorchronen-Alter:	siehe Isochronen-Alter
Gesamtgesteinsalter:	Altersdatierung an Gesamtgesteinsprobe, im Gegensatz zu: Mineralalter
Isochronen-Alter:	Ein Rb/Sr-Alter (u.a.) wird aus der Steigung einer Geraden, die durch mehrere Meßpunkte zu legen ist, bestimmt. Je nach dem, wie gut die Meßpunkte auf der Geraden liegen, spricht man von einem Isochronen-Alter bzw. von einem Errorchronen-Alter.
Mineralalter:	Altersdatierung an einer separierten Mineralphase, normalerweise mit besonders guter Stabilität des betrachteten Isotopensystems, im Gegensatz zu: Gesamtgesteinsalter
Modell- oder scheinbares Alter	Alter, das durch Anwendung einer Methode erhalten wird, die zwar theoretisch fundiert ist aber nur ein einzigen Meßpunkt und damit kein internes Gütekriterium liefert. Das Alter kann mit einem nicht spezifizierbaren Fehler behaftet sein.
Retentionsalter:	auch Schließungsalter: Zeit seit der eine geochronologisch verwertetes Isotopensystem als "geschlossen" angesehen wird.
Säkularvariation:	Änderungen sowohl des magnetischen Dipolfelds wie auch des Nicht-Dipolfelds der Erde im Laufe der Zeit. Scheint durch Perioden von einigen 100 Jahren charakterisiert zu sein.
Syntexis:	"Vorgang der völligen oder teilweisen Aufnahme, durch Einschmelzung oder gelegentlich auch erhöhte Metasomatose, von festen Nebengesteinsmaterial, unter Umständen auch fremden Lösungen oder Gasen durch ein Magma. Gestein: Syntexit" (MURAWSKI, 1972)
Uralitisierung:	"In späten Phasen der Magmaerstarung, im Eruptivkontakt und im Gebiet der Regionalmetamorphose erfolgende Bildung von Pseudomorphosen faseriger gemeiner Hornblende nach Augit" (MURAWSKI, 1972)
APWP:	"apparent polar wander path", scheinbare Polwanderkurve

KLEINER SPRACHFÜHRER :

Abu	Vater
Bir	Brunnen, Wasserloch
Djebel, Gebel, Jebel	Berg
Kadaweb	harter Fels
Nabati	Vegetarier
Nusab	Denkmal
Qeili	Mittagsrastplatz
Ras	Kopf, Gipfel, Felsvorsprung
Razam al Atshan	Mutter eines Durstigen
Safsaf	Art Nadelbaum
Sileitat	kleines Königreich
Sufur	gelb
Um	Mutter
Wadi	trockenes Flußbett

Literaturverzeichnis:

- AHMED, F.: The geology of Jebel Qeili igneous complex, Central Sudan. Geol.Rdsch., 64, 835-846, 1975
- AHMED, F.: The Sileitat-es-Sufr subvolcanic intrusion, Northern Khartoum Province. Sudan Notes Rec., 58, 226-233, 1977a
- AHMED, F.: Petrology and evolution of the Tehilla igneous complex, Sudan. J.Geol., 85, 331-343, 1977b
- ALI, S.E.M.: The geology of the Hamogar Group volcanic rocks, Southern Red Sea Hills, Sudan. Unpubl.M.Phil. thesis, Portsmouth Polytechnic, 1979
- ALMOND, D.C.: Discovery of a tin-tungsten mineralization in northern Khartoum Province, Sudan. Geol.Mag., 104, 1-12, 1967
- ALMOND, D.C.: Ignimbrite vents in the Sabaloka cauldron, Sudan. Geol.Mag., 108(2), 159-176, 1971
- ALMOND, D.C.: The Sabaloka Igneous Complex, Sudan. Phil.Trans.Roy. Soc., A287, 595-633, 1977
- ALMOND, D.C., KHEIR, O.M., POOLE, S.: Alkaline basalt volcanism in northeastern Sudan: a comparison of the Bayuda and Gedaref areas. J.Afr.Earth Sci., 2, 233-245, 1984
- ANGENHEISTER, G., SOFFEL, H.: Gesteinsmagnetismus und Paläomagnetismus. Studienhefte zur Physik des Erdkörpers 1, Gebr.Borntraeger Berlin-Stuttgart, 1972
- BAILEY, D.K.: Crustal warping. A possible tectonic control of alkaline magmatism. J.geophys.Res., 69, 1103-1111, 1964
- BARRETT, S.F.: Early Devonian continental positions and climate: a framework for paleophytogeography. In: Geological factors and the evolution of plants (Ed.: Tiffney, B.). New Haven, Yale University Press, 1985
- BARTH, H., MEINHOLD, K.D.: Mineral prospecting in the Bayuda Desert. Technical report of the Sudanese German Exploration project. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 1979 (nicht veröffentlicht)
- BARTH, H., MEINHOLD, K.D.: Geological map of the Bayuda Desert, Sudan: 1:250,000. Sudanese German Exploration Project, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 1981
- BARTH, H., BESANG, C., LENZ, H., MEINHOLD, K.D.: Results of petrological investigations and Rb/Sr age determinations on the non-orogenic igneous ring complexes in the Bayuda Desert, Sudan. Geol.Jahrbuch, B51, Hannover 1983
- BERTRAND, J.M.L., CABY, R., DUCROT, J., LANCELOT, J., MOUSSINE-POUCHKINE, A., SAADALLAH, A.: The late Panafrican ensialic linear fold belt of eastern Hoggar (Algeria): Geology, structural development, U/Pb geochronology, tectonic implications for the Hoggar shield. Pre-cambrian Res., 7, 349-376, 1978
- BLACK, R., LAMEYRE, J., BONIN, B.: The structural setting of alkaline complexes. J.Afr.Earth Sci., 3, 5-17, 1985
- BOWDEN, P.: The geochemistry and mineralization of alkaline ring complexes in Africa (a review). J.Afr.Earth Sci., 3, 17-39, 1985
- BRIDEN, J.C.: Palaeomagnetic estimate of the age of the Sabaloka Complex, Sudan. 17th ann.Rep.res.Inst.Afr.Geol., Univ. Leeds, 39-44, 1973
- BRIDEN, J.C., GASS, J.G.: Plate movement and continental magmatism, Nature, 248, 650-653, 1974
- BRIDEN, J.C., DUFF, B.A.: Pre-Carboniferous Paleomagnetism of

- Europe North of the Alpine orogenic belt. In: Paleo-reconstruction of the continents (Eds.: McElhinney, M.W., Valencio, D.A.). *Geodynamics Series 2*, AGU, 137-151, 1981
- BRIDEN, J.C., ARTHUR, G.R.: Precision of measurement of remanent magnetization. *Canadian J. Earth Sci.*, 18, N3, 527-538, 1981
- BROCK, A.: Paleomagnetism of Africa and Madagascar. In: *Paleoreconstruction of the continents* (Eds.: McElhinney, M.W., Valencio, D.A.). *Geodynamics Series 2*, AGU, 65-76, 1981
- BROOK, M., RUNDLE, C.C.: K-Ar age determinations on whole rock specimens from Northern Sudan. *Rep. Isotope geol. Unit, Inst. Geol. Sci., London*, 74.2, 1974 (nicht veröffentlicht)
- CAHEN, L., SNELLING, N.J., DELKAL, J., VAIL, J.R.: *The geochronology and evolution of Africa*. University Press, Oxford, 1984
- CAVANAGH, B.J.: Rb-Sr geochronology of some pre-Nubian igneous complexes of central and north-eastern Sudan. Ph.D. Thesis, University of Leeds, 1979 (nicht veröffentlicht)
- CHANNELL, J.E.T.: Palaeomagnetism of limestones from the Gargano Peninsula (Italy), and the implication of these data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 51, 605-616, 1977
- COCKS, L.R.M., FORTEY, R.A.: Faunal evidence for oceanic separations in the Paleozoic of Britain. *J. geol. Soc. London*, 139, 465-478, 1982
- COLLINSON, D.W.: *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism*. Chapman and Hall, London-New York, 1983
- CROOK, K.A.W.: Fore-arc evolution in the Tasman Geosyncline: the origin of the Southeast Australian continental crust. *J. Geol. Soc. Australia*, 27, 215-232, 1980
- DAVIES, J., NAIRN, A.E.M., RESSETAR, R.: The paleomagnetism of certain late Precambrian and early Paleozoic rocks from the Red Sea Hills, Eastern Desert, Egypt. *J. Geophys. Res.*, 85, B7, 3699-3710, 1980
- Defence Mapping Agency: *Charts of the Earth Magnetic Field*. Hydrographic Center, Washington D.C., 1980
- DELANY, F.M.: Ring structures in the Northern Sudan. *Eclog. Geol. Helv.*, 48, 133-148, 1955
- DELANY, F.M.: Observations on the Sabaloka Series of the Sudan. *Trans. geol. Soc. South Africa, Johannesburg*, 111-124, 1958
- DIETZ, R.S.: Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, 190, 854-857, 1962
- EL SHAZLI, E.M., KRS, M.: Paleogeography and Paleomagnetism of the Nubian sandstone, Eastern Desert of Egypt. *Geol. Rdsch.*, 62, 212-225, 1973
- FISHER, R.A.: Dispersion on a sphere. *Proc. Roy. Soc., London*, A217, 295-305, 1953
- FRANZ, G., PUCHELT, H., PASTEELS, P.: Petrology, geochemistry and age relations of Triassic and Tertiary Volcanic Rocks from SW-Egypt and NW-Sudan. *J. Afr. Earth Sci.*, 1986 (in Vorbereitung)
- GASS, I.G., CHAPMAN, D.S., POLLACK, H.N., THORPE, R.S.: Geological and geophysical parameters of midplate volcanism. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 288A, 581-597, 1978
- GMRD: Geological map of the Sudan: 1:2,000,000. Geological and Mineral Resources Department, Sudan und BRGM, Orleans, 1981
- GOLEBY, B.R.: Early paleozoic paleomagnetism in southeast Australia. *J. Geomag. Geoelec.*, 32, Suppl. III, SIII/1-21, 1980

- GOUGH, D.J.: A study of the paleomagnetism of the Pilansberg dykes. *Mon. Not. Roy. astr. Soc. Geophys. Suppl.*, 7, 196-213, 1956
- GOUGH, D.J., van NIEKERK, C.B.: On the paleomagnetism of the Bushveld gabbro. *Phil. Mag.*, 4, 126-136, 1959
- GRAHAM, K.W.T., HALES, A.L.: Preliminary palaeomagnetic measurements on Silurian sediments from South Africa. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 5, 318-325, 1961
- de GRUYTER, P., VOGEL, T.A.: A model of the origin of the alkaline complexes of Egypt. *Nature*, 291, 571-574, 1981
- HAHN, A.: Die Einheiten des internationalen Systems in der Geomagnetik. *J. Geophys.*, 44, 189-202, 1978
- HAILWOOD, E.A.: Paleomagnetic studies on rock formations in the High Atlas and AntiAtlas regions of Morocco. PhD Thesis, Univ. of Newcastle-upon-Tyne, England, 1972 (nicht veröffentlicht)
- HAILWOOD, E.A.: Paleomagnetism of Msissi norite (Morocco) and the Paleozoic reconstruction of Gondwanaland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 23, 376-386, 1974
- HARGRAVES, R.B., ONSTOTT, T.C.: Paleomagnetic results from some Southern African kimberlites and their tectonic significance. *J. Geophys. Res.*, 85, 3587-3596, 1980
- HARGRAVES, R.B., van HOUTEN, F.B.: Paleogeography of Africa in early-middle Paleozoic: Paleomagnetic and stratigraphic constraints and tectonic implications. *Abstr. 13. Colloq. African Geology*, St. Andrews, Schottland, p161, 1985
- HARGRAVES, R.B., DAWSON, T.C.: Paleomagnetism of the lower Paleozoic subvolcanic ring complex of the Air massif, Niger, 1986 (in Vorbereitung)
- HARRIS, N.B.W., DUYVERMAN, H.J., ALMOND, D.C.: The trace element and isotope geochemistry of the Sabaloka igneous complex, Sudan. *J. geol. Soc. London*, 140, 245-256, 1983
- HARRISON, C.G.A.: Analysis of the magnetic vector in a single rock specimen. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 60, 489-492, 1980
- HEEZEN, B.C.: The deep sea floor. In: *Continental drift* (Ed.: RUNCORN, S.K.). Academic Press, New York, 235-288, 1962
- HENNING, D., FLOHN, H.: Climate Aridity Index Map. United Nations Conference on Desertification, Nairobi, 1977
- HESS, H.H.: History of ocean basins. In: *Petrologic studies: A volume in honor of A.F. Buddington* (Eds.: Engle, A.E.J., James, H.L., Leonard, B.L.). *Geol. Soc. of America*, New York, 599-620, 1962
- HORN, P., MÜLLER-SOHNUS, D.: Arbeitsbericht zur Datierung basaltischer Gesteine-SFB69, München, 1985 (nicht veröffentlicht)
- HROUDA, F.: Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, 5, 37-82, 1982
- HUSSAIN, A.G., SCHULT, A., SOFFEL, H.: Palaeomagnetism of the basalts of Wadi Abu Tereifiya, Mandisha and dioritic dykes of Wadi Abu Shihat, Egypt. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 56, 55-61, 1979
- HUSSAIN, A.G., AZIZ, Y.: Paleomagnetism of Mesozoic and Tertiary Rocks from East El Owenat Area, Southwest Egypt. *J. Geophys. Res.*, 88, B4, 3523-3529, 1983
- IRVING, E.: Palaeomagnetism and its application to geological and geographical problems. Wiley, New York, 399p, 1964
- IRVING, E.: Drift of the major continental blocks since the Devonian. *Nature*, 270, 304-309, 1977
- IRVING, E., IRVING, A.: APWP Carboniferous through Cenozoic and Assembly of Gondwana. *Geophys. Surv.*, 5, 156-160, 1982
- IRVING, E.: Fragmentation and Assembly of the Continents, Mid-Carboniferous to Present. *Geophys. Surv.*, 5, 299-333, 1983

- KENT, D.V., DIA, O., SOUGY, J.M.A.: Paleomagnetism of lower-middle Devonian and upper Proterozoic - Cambrian(?) rocks from Mejeria (Mauritania, West-Africa). In: Plate Reconstruction from Paleozoic Paleomagnetism (Eds.: van der Voo, R., Scotese, C.R., Bonhommet, N.). Geodynamics Series 12, AGU, 99-116, 1984
- KERTZ, W.: Einführung in die Geophysik. B.I.Wissenschafts-Verlag, Mannheim-Wien-Zürich, 1969
- KIM, I.S.: Paläomagnetische Untersuchungen an altpaläozoischen Diabasen und Pillow-Laven aus dem Frankenwald in Nordost-Bayern. Diss. Nat.Fak.Univ.München, 1981
- KLEMENIC, P.M.: Isotope geology and geochemistry of selected igneous complexes and basement rocks in Eastern Sudan. PhD thesis, Portsmouth Polytech., 1983 (nicht veröffentlicht)
- KLITZSCH, E.: Northwestern Sudan and bordering areas: Geological Development since Cambrian Time. Berliner geowiss. Abh., A50, 23-45, 1984
- KRÖNER, A.: Panafrican plate tectonics and its repercussion on the crust of Northeast Africa. Geol.Rdsch., 68(2), 565-583, 1979
- LAMEYRE, J., BONIN, B.: Réfexions sur la position et l'origine des complexes magmatiques anorogéniques. Bull.Soc. géol.Fr., 20, 45-59, 1978
- LIVERMORE, R.A., SMITH, A.G., BRIDEN, J.C.: Palaeomagnetic constraints on the distribution of continents in the late Silurian and early Devonian. Phil.Trans.R.Soc. London, B309, 29-56, 1985
- LOWRIE, W., ALVAREZ, W.: Late Cretaceous polarity sequence: de-tailed rock and palaeomagnetic studies of the Scaglia Rossa limestone at Gubbio, Italy. Geophys.J.R.astr. Soc., 51, 561-581, 1977
- LOWRIE, W., CHANNELL, J.E.T., HELLER, F.: On the credibility of remanent magnetization measurements. Geophys.J.Roy. astr.Soc., 60, 493-496, 1980
- McELHINNY, M.W.: Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. Geophys.J., 8, 338-340, 1964
- McELHINNY, M.W., BRIDEN, J.C., JONES, D.L., BROCK, A.: Geological and geophysical implications of palaeomagnetic results from Africa. Rev.Geophys., 6, 201-238, 1968
- McELHINNY, M.W.: Palaeomagnetism and Plate tectonics. Cambridge University Press, Cambridge, 1973
- McELHINNY, M.W., EMBLETON, B.J.J.: Australian palaeomagnetism and Phanerozoic plate tectonics of eastern Gondwanaland. Tectonophysics, 22, 1-29, 1974
- McELHINNY, M.W., EMBLETON, B.J.J.: Precambrian and early palaeozoic palaeomagnetism in Australia. Phil.Trans.Roy.Soc., A280, 417-431, 1976
- MELCHIOR, P. (Hrsg): IUGG Chronicle no. 96 - Paris, Juin 1974
- MOLYNEUX, L.: A complete result magnetometer for measuring the remanent magnetization of rocks. Geophys.J.Roy.astr. Soc., 24, 429-433, 1971
- MOREL, P., IRVING, E.: Tentative paleocontinental maps for the early Phanerozoic and Proterozoic. J.Geol., 86, 5, 535-561, 1978
- MORGAN, W.J.: Plate motions and deep mantle convection. Mem.geol. Soc.Am., 132, 7-22, 1972
- MURAWSKI, H.: Geologisches Wörterbuch. F.Enke Verlag, Stuttgart, 1972
- NAGATA, T.: Rockmagnetism. Maruzen Co., Tokio, 1961
- PAYNE, M.A.: SI and Gaussian cgs Units, conversions and equations for use in geomagnetism. Phys.Earth Plan.Int., 26, P10-

P16, 1981

- PETERSEN, N.: Gesteinsmagnetismus. München, 1982 (nicht veröffentlicht)
- PURCELL, E.M.: Electricity and Magnetism. Berkely Physics Course Bd.2, McGraw Hill, 1965
- RAMDOHR, P.: Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. Akademie Verlag Berlin, 1960
- READMAN, P., O'REILLY, W.: Magnetic properties of oxidized (cation-deficient) titanomagnetites (Fe,Ti,■)₃O₄. J. Geomag.Geoelectr., 24, 69-90, 1972
- RESSETAR, R., NAIRN, A.E.M., MONRAD, J.R.: Two phases of Cretaceous-Tertiary Magmatism in the Eastern Desert of Egypt: Paleomagnetic, chemical and K-Ar evidence. Tectonophysics, 73, 169-193, 1981
- SAID, R.: Geology of Egypt. Elsevier, Amsterdam, 1962
- SALAMA, R.B.: Buried troughs, grabens and rifts in Sudan. J.Afr. Earth Sci., 3, 381-390, 1985
- SALMON, E., MONTIGNY, R., EDEL, J.B., PIQUE, A., THUIZAT, R., WESTPHAL, M.: The Msissi Norite revisited: K/Ar Dating, Petrography and Paleomagnetism. Geophys.Res.Let., 13, 741-743, 1986
- SARADETH, S.: Gesteins- und Paläomagnetische Messungen an Karbonatgesteinen aus Slowenien (Jugoslawien). Dipl. Arbeit am Inst.Allg.u.Angew.Geophys.Univ. München, 1983 (nicht veröffentlicht)
- SARADETH, S., SCHURR, K., SOFFEL, H., SCHULT, A., HUSSAIN, A.G.: Palaeomagnetic Measurements and Magnetostratigraphy of Sedimentary Rocks at the Cretaceous-Tertiary Boundary from the Oases of Dakhla and Kharga in the Western Desert of Egypt. Münchner Geophys.Mittl., ISSN: 09312445, Bd.1, 1986
- SARADETH, S., SOFFEL, H., SCHULT, A.: Palaeomagnetism of sedimentary rocks at the Cretaceous-Tertiary Boundary from the Oases of Dakhla and Kharga in the Western Desert of Egypt. J.Geophys., 1986 (im Druck)
- SCHANDELMEIER, H., RICHTER, A., FRANZ, G.: Outline of the Geology of magmatic and metamorphic units between Gebel Uweinat and Bir Safsaf (SW Egypt/NW Sudan). J.Afr.Earth Sci., 1, 275-283, 1983
- SCHANDELMEIER, H., DARBYSHIRE, F.: Metamorphic and magmatic events in the Uweinat-Bir Safsaf Uplift (Western Desert/Egypt). Geol.Rdsch., 73/2, 819-831, 1984
- SCHMIDT, P.W., MORRIS, W.A.: An alternative view of the Gondwana paleozoic APWP. Can.J.Earth Sci., 14, 2674-2678, 1977
- SCHMIDT, P.W., EMBLETON, B.J.J., CUDAHY, T.J., POWELL, C.McA.: Pre-folding and pre-magmatizing magnetizations from the Devonian Comerong volcanics, New South Wales, Australia and their bearing on the Gondwana pole path. Tectonophysics, 5, 135-150, 1986
- SCHULT, A., SOFFEL, H.: Palaeomagnetism of Tertiary basalts from Libya. Geophys.J.Roy.astr.Soc., 32, 373-380, 1973
- SCHULT, A.: Palaeomagnetism of Tertiary volcanic rocks from the Ethiopian Southern Plateau and the Danakil block. J.Geophys., 40, 203-212, 1974
- SCHULT, A., SOFFEL, H.C., HUSSAIN, A.G.: Palaeomagnetism of Cretaceous Nubian sandstone. J.Geophys., 44, 333-340, 1978
- SCHULT, A., HUSSAIN, A.G., SOFFEL, H.C.: Palaeomagnetism of upper Cretaceous Volcanics and Nubian Sandstones of Wadi Natash, SE Egypt and implications for the Polarwandler Path for Africa in the Mesozoic. J.Geophys., 50, 16-22, 1981

- SCOTese, C.R., van der VOO, R., BARRETT, S.F.: Silurian and Devonian base maps. Phil. Trans. R. Soc. London, B309, 57-77, 1985
- SHIVE, P.N.: Suggestions for the use of SI units in Magnetism. Eos, AGU, 67, p25, 1986
- SMITH, G.A., HALLAM, A.: The Fit of the Southern Continents. Nature, 225, 139-144, 1970
- SOFFEL, H.C.: Palaeomagnetism and Archaeomagnetism. In: Landolt-Börnstein, Neue Serie, Bd V/2b (Geophysik), (Hrsg.: Fuchs, K., Soffel, H.C.), 1984
- STACEY, F.D., BANERJEE, S.K.: The physical principles of rock magnetism. In: Developments in Solid Earth Geophysics. Elsevier, Amsterdam, 1974
- SUDAN SURVEY DEPARTMENT: Karte As Sabaloqa, 1:100 000, Blatt 330, Khartum, 1975
- SUDAN SURVEY DEPARTMENT: Karte Khartoum, 1:100 000, Blatt 359, Khartum, 1975
- SUDAN SURVEY DEPARTMENT: Karte Jibal Abkit, 1:100 000, Blatt 110, Khartum, 1982
- SUDAN SURVEY DEPARTMENT: Karte Mahattat Derudeb, 1:100 000, Blatt 251, Khartum, 1983
- TARLING, D.H.: Palaeomagnetism. Principles and applications in Geology, Geophysics and Archaeology. Chapman and Hall, London-New York, 1983
- VAIL, J.R., REX, D.C.: Potassium-argon age measurements on the pre-Nubian basement complex rocks from Sudan. Proc. geol. Soc., 1664, 205-214, 1971
- VAIL, J.R.: Location and geochronology of igneous ring-complexes and related rocks in north-east Africa. Geol. Jb., B20, 97-114, 1976
- VAIL, J.R., ALMOND, D.C., HUGHES, D.J., KLEMENIC, P.M., POOLE, S., NOUR, S.E.M., EMBLETON, J.C.B.: Geology of the Wadi Oko-Khor Hayet Area, Red Sea Hills, Sudan. Ministry of Energy and Mining, Bull. 34, 1984
- VAIL, J.R.: Alkaline ring complexes in Sudan. J. Afr. Earth Sci., 3, 51-59, 1985
- van HOUTEN, F.B., HARGRAVES, R.B.: Early-middle Paleozoic Drift of Western Gondwana: Paleomagnetic and stratigraphic constraints, 1986 (in Vorbereitung)
- VINE, F.J., MATTHEWS, D.H.: Magnetic anomalies over ocean ridges. Nature, 199, 947-949, 1963
- VOPEL, D.: Observation and Description of the main geomagnetic field and its secular variation. In: Landolt-Börnstein, Neue Serie, Bd V/2b (Geophysik), (Hrsg.: Fuchs, K., Soffel, H.C.), 1984
- WATSON, G.S.: A test for randomness of directions. Mon. Not. Roy. astr. Soc., Geophys. Suppl., 7, 160-161, 1956
- WEGENER, A.: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Sammlung Vieweg, Braunschweig, Heft 23, 1915
- WHITEMAN, A.J.: The geology of the Sudan Republic. Clarendon Press, London, 1971
- WILSON, R.W., WATKINS, N.D.: Correlation of petrology and natural magnetic polarity in Columbia Plateau basalts. Geophys. J. Roy. astr. Soc., 12, 405-424, 1967
- ZIJDERVELD, J.D.A.: A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. In Methods in Palaeomagnetism (Hrsg: Collinson, D.W., Creer, K.M., Runcorn, S.K.), Elsevier, 1967
- ZIJDERVELD, J.D.A., HAZEU, G.J.A., NARDIN, M., van der VOO, R.: Shear in the Tethys and the Permian paleomagnetism in the Southern Alps, including new results. Tectonophysics, 10, 639-661, 1970

DANKSAGUNG:

Als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 69 - Geowissenschaftliche Probleme arider Gebiete - konnte ich die vorliegende Arbeit am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik in München anfertigen.

Prof.Dr. H.SOFFEL gilt an erster Stelle mein Dank. Er hat mein Interesse an der Paläo- und Gesteinsmagnetik geweckt und gefördert. Er hat diese Arbeit angeregt und betreut. Durch hilfreiche Anmerkungen war er am Gelingen beteiligt.

Prof.Dr. A.SCHULT ermöglichte es mir, bereits als Diplomand erste Erfahrungen mit paläomagnetischer Feldarbeit in Afrika zu sammeln. Durch seine kritischen Anmerkungen zur Vorversion dieser Arbeit konnten einige Verbesserungen vorgenommen werden.

Prof.Dr. N.PETERSEN, dem wissenschaftlichen Leiter des Labors für Gesteins- und Paläomagnetismus in Niederlippach, verdanke ich die Möglichkeit, das Labor und die Geräte unter, im vollen Sinn des Wortes, "ungestörten" Verhältnissen zu nutzen.

Die Herren Dr. E.APPEL und Dipl.-Geophys. K.SCHURR beteiligten sich an den Geländefahrten. Ohne ihren engagierten Einsatz und ihre Kameradschaft wäre die Probensammlung weitaus weniger umfangreich ausgefallen.

Die Herrn Dr. EL SAYEGH, M.Sc. M.SHIEKH und Dr. Y.HASSAN waren in Khartum wie auch im Gelände unentbehrlich bei der Bewältigung wissenschaftlicher und organisatorischer Probleme. Daneben haben sie noch Zeit gefunden, uns mit ihrer Heimat, Land und Leuten vertraut zu machen.

Dr. P.HORN hat mich freundschaftlich in Fragen der Petrologie und Geochronologie unterstützt. Ihm verdanke ich viele anregende Diskussionen und eine kritische Durchsicht des Manuskripts.

Dr. EL GORESY war bei der erzmikroskopischen Untersuchung und Interpretation behilflich.

Herr Dipl.-Geophys. Ch.ROLF und alle Mitglieder der Arbeitsgruppe waren stets zu Hilfe und Diskussion bereit.

Die Herrn Dipl.-Geophys. V.HOFFMANN und cand.geol. S.SCHÄFFLER waren an der Durchführung der Labormessungen beteiligt.

Die Mitglieder des SFB69, besonders des Teilprojekts A1, waren nicht nur "geologische Wegbereiter". Gemeinsam mit und aufbauend auf ihren Vorarbeiten konnte die Beprobung in SW-Ägypten durchgeführt werden. Herr Dr. G.MATHEIS war bei allen Fahrten für die Koordination zuständig.

Die Herren Dipl.-Geophys. H.J.DITTUS und U.TEUFEL unterstützten mich freundschaftlich in allen Belangen der elektronischen Datenverarbeitung.

Die Mitarbeiter der Werkstatt waren für die prompte Herstellung und Wartung einer Reihe von Geräten verantwortlich.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat diese Arbeit durch die Bereitstellung finanzieller Mittel ermöglicht.

Allen Genannten und Nichtgenannten danke ich herzlich für ihren Beitrag zum Abschluß dieser Arbeit.

L E B E N S L A U F :

- 8.12.1956 Geburt als erstes Kind des Forstdirektors
Peter Saradeth und seiner Ehefrau Dorothea,
geb. Pöhner, in München
- 1963 - 1967 Besuch der Volksschule in München und Bad
Reichenhall
- 1967 - 1976 Besuch des Neusprachlichen Gymnasiums in Bad
Reichenhall und Kötzing
- 25.6.1976 Abschluß mit dem Zeugnis der Reife
- 7.1976 - 9.1977 Wehrdienst Panzeraufklärer Roding
- 1.10.1977 Aufnahme des Studium der Geophysik an der
Ludwig-Maximilians Universität in München
- 2.11.1979 Diplomvorprüfung
- 9.1980 - 8.1981 Student der Earth Sciences an
Montana State University, USA
- 28.11.1983 Diplomhauptprüfung
- seit 1.1.1984 wissenschaftlicher Mitarbeiter im
Sonderforschungsbereich 69: Geowissen-
schaftliche Probleme arider Gebiete
- 1.5.1984 Aufnahme des Promotionsstudiums an der Geowis-
senschaftlichen Fakultät der Ludwig-
Maximilians Universität in München
- seit 1984 Arbeit an der vorliegenden Dissertation

Nachtrag:

Nach Niederschrift der Arbeit wurden von HORN und MÜLLER-SOHNUS (1986) weitere radiometrische Alter mit der K/Ar-Methode erhalten und folgendermaßen interpretiert:

Lokalität Proben-Nr.	Probenart	Alter (Ma)
NORTHERN VOLC.FIELD 47-8-2	Gesamtgestein Gesamtgestein, geätzt	62.7 ± 1.6 $80.4 \pm 2.0^{1)}$
NUSAB EL BALGUM 78-1	Hornblende	$161 \pm 4^{2)}$
SABALOKA 111-9-3	Gesamtgestein Gesamtgestein, geätzt Gesamtgestein, geätzt	378 ± 9 388 ± 9 $402 \pm 10^{3)}$
QEILI 145-8-2	Biotit Hornblende	$439 \pm 11^{2)}$ $460 \pm 12^{2)}$
NABATI 56-9-1	Biotit Biotit	$575 \pm 14^{2)}$ $603 \pm 15^{2)}$

¹⁾: Extrusionsalter

²⁾: Intrusions-/Abkühlungsalter

³⁾: Metamorphosealter/Abkühlungsalter

Damit kann nun ein devonisches Alter für Sabaloka als gesichert angenommen werden. Die früheren Ergebnisse mit der Rb/Sr Methode für Nabati sind bestätigt. Für den Qeili-Komplex liegt nun erstmals ein radiometrisches Alter vor. Für die Basalte des Northern Volcanic Field konnte durch Ätzversuche Argonverlust nachgewiesen werden und ein höheres Extrusionsalter wurde bestimmt. Das K/Ar-Alter für Nusab el Balgum mit 161 Ma ist deutlich niedriger als das Rb/Sr-Alter von 216 Ma, was auf ein spätere Schließung des Kalium-Argon Systems hinweist.

HORN, P., MÜLLER-SOHNUS, D.: Arbeitsbericht zur Datierung von ägyptischen Gesteinen bekannter magnetischer Feldrichtung im SFB69, München, 1986 (nicht veröffentlicht)

